

基于菲涅耳二元相位整形的啁啾脉冲压缩

李百宏^{1,2*}, 夏志广^{1,2}, 赵鹏达¹, 项晓², 董瑞芳^{2**}, 张涛^{2***}

¹西安科技大学理学院, 陕西 西安 710054;

²中国科学院国家授时中心中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600

摘要 相位补偿是脉冲压缩和产生超短激光脉冲的关键技术之一。首先通过类比菲涅耳波带片在空间中的相位函数,理论上证明菲涅耳二元相位整形方案可以实现类似透镜的功能,可以在频域中引入负二次光谱相位(负色散)。然后利用所提方案补偿啁啾脉冲的色散,从而将其变为变换受限脉冲,使其脉宽压缩到变换受限的时间宽度。所提方案仅与二次相位有关,不依赖于光谱振幅,因此对具有对称性分布的各种脉冲形状均适用。最后给出常见的高斯脉冲与方波脉冲的数值计算结果,在理论上验证所提方案的正确性。所提方案为啁啾脉冲压缩提供一种新的思路和方法,并可以拓展到有关色散补偿的其他领域中。

关键词 超快光学; 脉冲压缩; 二元相位整形; 菲涅耳波带片; 负色散; 相位补偿

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.193201

Chirped Pulse Compression Based on Fresnel-Inspired Binary Phase Shaping

Li Baihong^{1,2*}, Xia Zhiguang^{1,2}, Zhao Pengda¹, Xiang Xiao², Dong Ruifang^{2**}, Zhang Tao^{2***}

¹College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

²Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China

Abstract Phase compensation is one of the key technologies for pulse compression and ultrashort laser pulse generation. First, we use the phase function of the Fresnel binary phase shaping scheme can achieve a lens-like function, and can introduce a negative secondary spectral phase (negative dispersion) in the frequency domain. Then, the proposed scheme is used to compensate the dispersion of the chirped pulse, thereby turning it into a transformed-limited pulse, and its pulse width is compressed to the time width of the transformed-limited. The proposed scheme is only related to the quadratic phase and does not depend on the spectral amplitude, so it is applicable to various pulse shapes with symmetrical distribution. Finally, the numerical calculation results of common Gaussian pulse and square-wave pulse are given to verify the correctness of the proposed scheme in theory. The proposed scheme provides a new idea and method for chirped pulse compression, and can be extended to other fields related to dispersion compensation.

Key words ultrafast optics; pulse compression; binary phase shaping; Fresnel zone plates; negative dispersion; phase compensation

OCIS codes 320.5520; 320.5540; 320.7110

1 引言

高时间分辨率的探测技术依赖于超短脉冲技术

而发展^[1],脉冲压缩是产生超短激光脉冲的关键技术之一。脉冲压缩技术的研究已经有一定的历史^[2-12],其发展带动了激光科学朝着最短脉冲的方

收稿日期: 2019-12-14; 修回日期: 2020-01-16; 录用日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(11504292, 11974275)、陕西省科技计划(2019TD-026)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JM-346, 2016JQ1036)、西安科技大学优秀青年科技基金(2019YQ2-13)

* E-mail: baihongli@xust.edu.cn; ** E-mail: dongruifang@ntsc.ac.cn; *** E-mail: tzhang@xust.edu.cn

向快速改革,脉冲宽度已经从纳秒和皮秒量级进入到现在的飞秒量级。超快过程^[13]的研究需要使用更短的超短脉冲,目前超短脉冲技术正朝着具有几个光学周期的脉冲持续时间^[14],甚至更短的阿秒脉冲^[1]方向发展。当激光脉冲在空气或其他色散介质中传输时,由群速度色散引起相位移动而造成最初的脉冲被展宽。为了补偿这种色散,可以利用光栅对、棱镜对或啁啾镜对频谱中所有频率分量的相位进行均一化处理从而压缩脉冲^[15-19]。然而,对于上述方法中的大部分而言,都需要让光通过材料来传输,因而损耗了光子能量,并限制了其所能压缩的带宽及压缩效率。此外,对于能量在几百甚至几千焦范围内的脉冲,用于脉冲压缩的光栅需要在真空室内精确校准且面积超过 1 m^2 ^[20-21],这会导致制作成本非常昂贵^[22-23]。如今,由于脉冲整形器件^[24]的集成化和简单化,从而提供了一种新的脉冲压缩方法。Wilcox 等^[25]比较了仅使用单个脉冲整形器实现脉冲压缩目标所用各种方法的优缺点。

本文根据菲涅耳波带片的结构,基于脉冲整形技术提出一种菲涅耳二元相位整形(FIBPS)方案。通过类比经典波带片在空间中的相位函数,证明所提方案能够实现类似透镜的功能,可以在频域中引入负二次光谱相位因子(负色散)。利用该方案对啁啾脉冲光谱进行整形,可以补偿啁啾脉冲的色散,并将其脉宽压缩到变换受限(TL)的时间宽度。若光谱呈中心对称,则压缩效果不依赖于脉冲光谱的形状,这对常用的高斯脉冲和方波脉冲等均适用。最后对理论计算的结果进行分析和讨论。

2 基于 FIBPS 的啁啾脉冲压缩

2.1 FIBPS

包含二次频率相位因子的啁啾脉冲电场在频域中可以表示为

$$E(\omega) = A(\omega) \exp[i\alpha(\omega - \omega_0)^2], \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; $A(\omega)$ 为光谱振幅; ω_0 为中心角频率; α 为啁啾参数,用来反映啁啾量的大小。(1)式经过傅里叶变换后可得到时域脉冲电场,表达式为

$$E(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega') \exp[i\alpha\omega'^2] \exp[i\omega't] d\omega', \quad (2)$$

式中: $\omega' = \omega - \omega_0$; t 为时间变量。(2)式出现一个二次非线性频率相位因子 $\alpha\omega'^2$, 由于这一相位因子的存在,时域脉冲不是 TL 脉冲。尽管入射的初始啁啾脉冲的频谱可以很宽,但脉宽并不是很短,反而由

于二次相位的影响,脉宽被展宽,显然这不利于超短脉冲的产生。为了将脉冲重新压缩回 TL 的宽度,必须消除或补偿频率二次相位。

实验通过对啁啾脉冲光谱使用 FIBPS 方案来解决上述问题,具体方法如下。

考虑光谱带宽的积分范围,(2)式可以重新写为

$$E(t, \Delta\omega) \propto \int_{-\Delta\omega/2}^{\Delta\omega/2} A(\omega') \exp[i\alpha\omega'^2] \exp[i\omega't] d\omega', \quad (3)$$

式中: $\Delta\omega$ 为啁啾脉冲的光谱宽度(全宽)。根据所提方案^[26-29],针对(1)式的 α ,则整形光谱的第 n 个频率波带的边界可以表示为

$$\pm \Omega_n = \pm \sqrt{[3 + 4(n-1)]\pi/\alpha}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

频率波带的总数 $N = 2n - 1$ 。根据(4)式可以得到一个 FIBPS 函数,表达式为

$$F_{\text{FIBPS}}(\Omega) = \left[\prod_n \text{sgn}(\Omega_n - |\Omega|) + 1 \right] \pi/2, \quad (5)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\Pi(\cdot)$ 为乘积函数。(5)式对不同的频率波带只取 0 或 π 两个相位值,且相邻两波带间的相位差为 π ,即相邻频率波带的相位相反。

2.2 啁啾脉冲压缩

在 FIBPS 函数中引入一个负的频率二次相位因子补偿啁啾脉冲的色散,使(2)式满足 TL 条件,这就可以将啁啾脉冲的脉宽压缩到 TL 的时间宽度。该方案的思想来源于经典的菲涅耳波带片在空间中的相位函数^[30],表达式为

$$\varphi(r) = \exp(-i\pi r^2/\lambda f), \quad (6)$$

式中: λ 和 f 分别为入射光的波长和波带片的焦距; r 为空间坐标。根据经典波带片的划分方法,第 k 个波带的半径为

$$\rho_k = \sqrt{k\lambda f}. \quad (7)$$

第 n 个频率菲涅耳波带的边界值可以写为

$$\Omega_n = \sqrt{4n(1 - 1/4n)\pi/\alpha} = \sqrt{k'\lambda'f'}, \quad (8)$$

式中: $k' = 4n$; $\lambda'f' = (1 - 1/4n)\pi/\alpha$ 。类比(6)式,菲涅耳波带片在频域中的相位函数可以写为

$$\varphi(\omega) = \exp(-i\pi\omega^2/\lambda'f') = \exp[-i\alpha\omega^2/(1 - 1/4n)]. \quad (9)$$

由(9)式可知,其与经典的菲涅耳波带片在空间中的相位函数的表达形式是一样的。当波带片的个数取无穷大时,在频域中可以引入一个负的频率二次相位因子 $-\alpha$,这类似于产生一个菲涅耳透镜(频率透镜),此时(2)式中的二次相位就会被

消除并满足 TL 条件,从而使得啁啾脉冲的脉宽压缩到 TL 的时间宽度。实际上,只需要 n 值取足够大($n=21$),即可获得较满意的压缩结果。图 1 为

高斯型光谱的 FIBPS 方案示例($n=7, 11, 21$)。为了方便表示,采用波长来代替频率以表示横坐标。

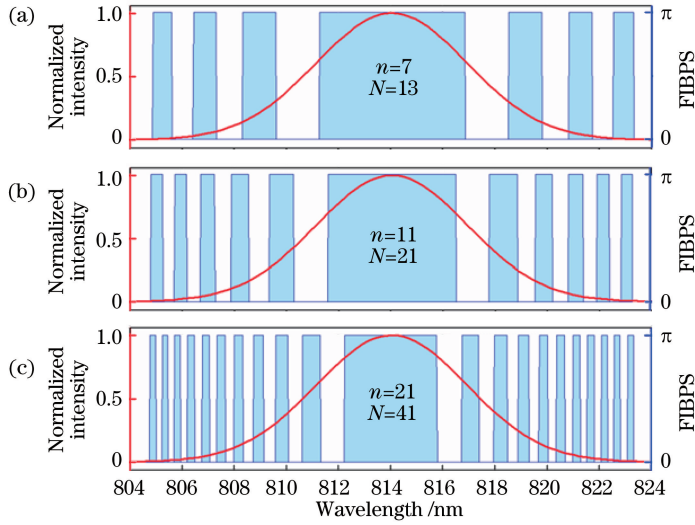


图 1 高斯型光谱在不同 n 值的 FIBPS 方案。(a) 7; (b) 11; (c) 21

Fig. 1 FIBPS scheme for Gaussian spectra at different values of n . (a) 7; (b) 11; (c) 21

根据实验室现有的实验参数,给出由理论计算得到的压缩结果。模拟计算所用的参数:脉冲的中心波长为 814 nm,半峰全宽(FWHM)为 7 nm,整形带宽(全宽) $\Delta\lambda = 18.674$ nm ($\Delta\omega = 5.315 \times 10^{13}$ rad/s),整形范围为 804.47~823.14 nm。根据这一整形带宽, $n=7$, $n=11$ 和 $n=21$ ($N=13$, $N=21$ 和 $N=41$)对应的啁啾系数分别为 $\alpha_1 = 30023$ fs²(chirp 1), $\alpha_2 = 47815$ fs²(chirp 2)和 $\alpha_3 = 923042$ fs²(chirp 3)。图 2 为利用 FIBPS 方案对高斯型啁啾脉冲压缩的结果。图 2(a)为不同啁啾系数的脉冲被展宽的结果。从图 2(a)可以看到,啁啾系数越大,脉冲时域宽度越大,说明啁啾系数对脉宽起到展宽的作用。比起 chirp 3 的展宽结果,压缩的脉宽被压缩到很窄的宽度,压缩因子为 23.3,压缩后的强度是未压缩(chirp 2)的 12 倍。图 2(b)为归一化的压缩结果。从图 2(b)可以看到, $n=7$ 和 $n=11$ 与的 TL 结果(虚线)相比,说明压缩后的脉宽与 TL (约为 150 fs)一致,且 n 值越大,压缩结果越接近于 TL。为了更细致地给出所提方案与 TL 的比较结果,在正向延迟时间的范围内比较压缩结果与 TL 结果,如图 2(c)所示。从图 2(c)可以看到,在靠近延迟时间零点的位置,压缩的结果与 TL 几乎完全吻合,在远离延迟时间零点的位置,两种结果均出现差异,但随着 n 值的增加,压缩效果逐渐趋近于 TL,这与(9)式中 n 值越大补偿效果越好的理论一

致。从物理意义上来说,由于 n 值取整数,因此相位补偿是分立的,且较粗略的。 n 值越大,相位补偿越精细,越接近于连续的相位补偿。随着 n 值的增大,补偿效果也越来越好。

定义相位补偿系数 $\xi = 1 - 1/4n$,当 n 值足够大时, ξ 值趋于 1,此时达到完美补偿。 ξ 和压缩的带宽随着 n 值的演化规律,如图 2(d)所示。从图 2(d)可以看到,随着 n 值的增加,补偿系数逐渐减小,最终趋于 1;压缩的带宽也随着 n 值的增加而减小,最终趋于 TL 的脉宽。

图 3 为利用所提方案对方波型啁啾脉冲压缩的结果。从图 3 可以看到,压缩的脉宽均与 TL 一致,只是脉冲形状有所不同,这说明所提方案只与二次相位因子有关,与光谱振幅无关,适用于具有对称性分布的各种脉冲形状。不同的是,图 2 中高斯光谱振幅经过傅里叶变换到时域后,其时域脉冲形状仍为高斯型;方波型光谱振幅经过傅里叶变换到时域后,其时域脉冲为 sinc 函数形式,可以使用单缝衍射的原理进行类比理解,如图 3(b)所示。方波脉冲经过色散介质后,在时域的展宽过程可以类比一束激光在空间中的单缝衍射行为,此时色散量的大小相当于缝宽。随着啁啾系数的增大,缝的宽度增加,脉冲被展宽。当啁啾系数很大时,即为宽缝衍射的结果,可理解为是两个直边衍射的叠加。

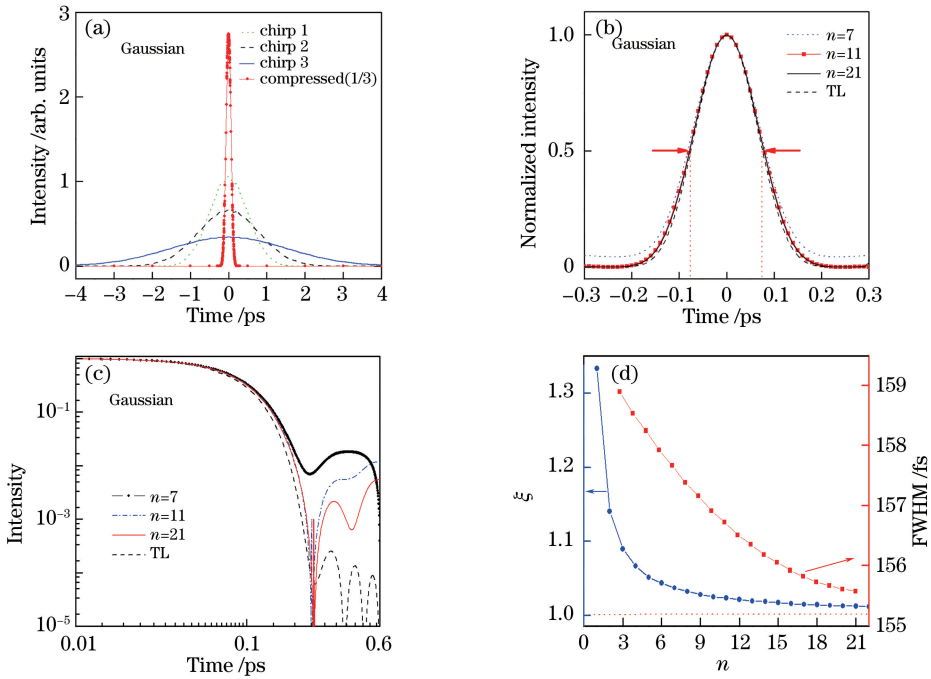


图 2 利用 FIBPS 方案对高斯型啁啾脉冲压缩的结果。(a)高斯型啁啾激光脉冲的压缩结果；(b)归一化的压缩结果；(c)压缩结果与 TL 结果；(d) 不同 n 值下的 ξ 和脉宽

Fig. 2 Results of Gaussian chirped pulse compression using FIBPS scheme. (a) Compression results of Gaussian chirped laser pulse; (b) normalized compression results; (c) compression results and TL result; (d) ξ and pulse width under different values of n

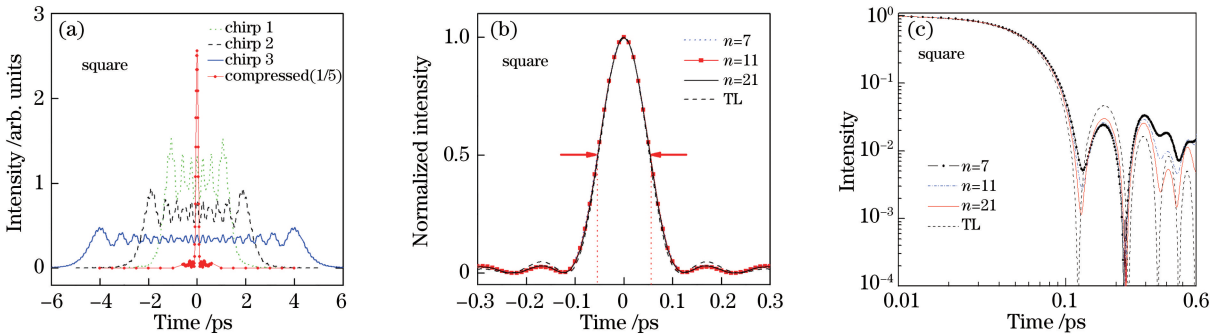


图 3 利用 FIBPS 方案对方波型啁啾脉冲压缩的结果。(a)方波型啁啾激光脉冲的压缩结果；(b)归一化的压缩结果与归一化的 TL 结果；(c)压缩结果与 TL 结果

Fig. 3 Results of square-wave chirped pulse compression using FIBPS scheme. (a) Compression results of square-wave chirped laser pulse; (b) normalized compression results and normalized TL result; (c) compression results and TL result

3 分析与讨论

根据(9)式,当 n 值取无穷大时,在频域中可以引入负的频率二次相位因子 $-\alpha$ 。原则上, n 取值越大,补偿效果越接近于理想情况。在理论计算中,尽管只给出 $n=7, n=11$ 和 $n=21$ 的结果,但可以看到三种情况下压缩的脉宽与 TL 一致,因此实际中只要 n 值足够大就可以获得较好的补偿效果。但需要注意的是,并非 n 取值越大越好,因为实际中

波长与像素点的对应关系是分立的,且不连续的。随着 n 值的增大,设定的调制或整形波长与像素点发生偏移,这会造成压缩效果变差,所以实际中要合理选择 n 值的大小以获取满意的压缩效果。此外,实际中由于受到脉冲整形精度的限制,其会对脉冲能量有损耗,尽管压缩后的脉宽和 TL 一致,但压缩后的脉冲强度必然小于 TL。另外,根据(4)式,当啁啾脉冲的光谱带宽一定时,FIBPS 函数中的 α 与 n 成正比例,因此可以很方便地通过调节 n 值的大

小来匹配所需要的 α 值。但缺点是,由于 n 值只能取正整数,因此这种调节是分立的,且不连续的。反过来考虑,如果所提方案应用于TL脉冲,则同样会给该脉冲引入负色散(啁啾),使其变成负啁啾脉冲,从而展宽其脉宽,因此所提方案可以将TL脉冲变成负啁啾脉冲。

需要说明的是,实验仅考虑二次相位在脉冲压缩中所起到的作用,并未考虑三阶和四阶等其他高阶项的影响。在超强超短脉冲实验中,这些高阶项的影响不能忽略,其会对脉宽和脉冲对称性造成大的影响,只有将这些高阶项均补偿掉,才能得到最理想的脉冲压缩效果。另外,由于受到相位整形精度的限制,所提方案主要适用于宽线宽的脉冲,对窄线宽的脉冲压缩不太适用。从傅里叶变换角度来讲,当脉冲的时间带宽积一定时,宽线宽的脉冲压缩有利于获得更窄脉宽的脉冲。如果利用所提方案对高能量和高峰值功率的脉冲进行压缩,还需要考虑整形设备的损伤阈值问题。实际情况下可以将待整形的脉冲光谱利用光栅在空间中展宽,使得入射到调制器单位面积的光强减小,这样可以提高所提方案对高能量脉冲压缩的适用性。

4 结 论

通过类比经典菲涅耳波带片在空间中的相位函数,证明FIBPS方案可以实现类似透镜的功能,在频域中引入负二次相位因子从而可以补偿啁啾脉冲的色散,将原始的啁啾脉冲转变为TL脉冲,实现啁啾脉冲激光的压缩。所提方案只与二次相位有关,与光谱振幅无关,因此对具有对称性分布的各种形状脉冲均适用。接着给出常见的高斯脉冲与方波脉冲的数值计算结果,从理论上验证了所提方案的正确性。所提方案能够引入负色散(啁啾),且色散量的大小可以通过二元相位的个数来调节,因此可以将其拓展到与色散补偿相关的其他领域中。实验中,压缩结果会受到相位整形精度的影响,整形精度越高,效果越理想,但压缩后的脉冲强度会低于TL。所提方案为啁啾脉冲压缩提供一种新的思路和方法,有望克服大面积光栅制作成本高、校准难度大的缺陷。下一步将对所提方案的正确性开展相关实验验证工作。

参 考 文 献

[1] Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 163-234.

- [2] Treacy E. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1969, 5(9): 454-458.
- [3] Grischkowsky D. Optical pulse compression [J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 25(10): 566-568.
- [4] Shank C V, Fork R L, Yen R, et al. Compression of femtosecond optical pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 40(9): 761-763.
- [5] Grischkowsky D, Balant A C. Optical pulse compression based on enhanced frequency chirping [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 41(1): 1-3.
- [6] Winful H G. Pulse compression in optical fiber filters [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 46(6): 527-529.
- [7] Zhang F, Wu J, Lin J T. Performance study of a comb-like dispersion profiled fiber compressor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(7): 768-773.
张帆, 伍剑, 林金桐. 利用梳状色散光纤实现光脉冲压缩的特性研究 [J]. *光学学报*, 2001, 21(7): 768-773.
- [8] Ma W W, Li S G, Yin G B, et al. High efficiency pulse compression in tapered microstructure fibers in anomalous dispersion region [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 4720-4725.
马文文, 李曙光, 尹国冰, 等. 反常色散锥形微结构光纤中高效率脉冲压缩研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 4720-4725.
- [9] Liu Y L, Luo A P, Luo Z C, et al. A method of compression of parabolic self-similar pulses based on fiber link consisting of two segments of fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0519002.
刘艳丽, 罗爱平, 罗智超, 等. 一种基于两段光纤链路的抛物自相似脉冲压缩方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0519002.
- [10] Li B, Lou S Q, Tan Z W, et al. Two kinds of optical pulse compression approaches based on cross phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(19): 194203.
李博, 娄淑琴, 谭中伟, 等. 两种基于交叉相位调制的光脉冲压缩方案 [J]. *物理学报*, 2012, 61(19): 194203.
- [11] Song Z M, Ma Q, Sun Y J, et al. Study on the optimum condition for spectrum compression of the intense ultrashort pulses by cascaded hollow fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s132001.
宋振明, 马茜, 孙亚娟, 等. 超强飞秒脉冲在分段中空光波导中脉冲压缩最优化的研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s132001.

- [12] Ye R, Zhang B, Li K Y. Ultra-short laser pulse compression by using the group-velocity-matched cascaded quadratic nonlinearity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 094212.
叶荣, 张彬, 李恪宇. 利用群速度匹配的级联二阶非线性实现超短激光脉冲压缩 [J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094212.
- [13] Weiner A. *Ultrafast optics* [M]. Berlin: Wiley, 2009.
- [14] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [15] Fork R L, Cruz C H, Becker P C, et al. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(7): 483-485.
- [16] Baltuska A, Wei Z, Pshenichnikov M S, et al. Optical pulse compression to 5 fs at a 1-MHz repetition rate [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(2): 102-104.
- [17] Armstrong M R, Plachta P, Ponomarev E A, et al. Versatile 7-fs optical parametric pulse generation and compression by use of adaptive optics [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(15): 1152-1154.
- [18] Yamane K, Zhang Z G, Oka K, et al. Optical pulse compression to 3.4 fs in the monocycle region by feedback phase compensation [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22): 2258-2260.
- [19] Pervak V, Ahmad I, Fulop J, et al. Comparison of dispersive mirrors based on the time-domain and conventional approaches, for sub-5-fs pulses [J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2207-2217.
- [20] Li C M, Wu J H, Chen X R, et al. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1943-1946.
李朝明, 吴建宏, 陈新荣, 等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1943-1946.
- [21] Zuegel J D, Borneis S, Barty C, et al. Laser challenges for fast ignition [J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(3): 453-482.
- [22] Shi L. *Fabrication of large size diffraction gratings* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
石磊. 大尺寸衍射光栅的制造 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [23] Habara H, Xu G, Jitsuno T, et al. Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1783-1785.
- [24] Weiner A M. Ultrafast optical pulse shaping: a tutorial review [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(15): 3669-3692.
- [25] Wilcox D E, Ogilvie J P. Comparison of pulse compression methods using only a pulse shaper [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(7): 1544-1554.
- [26] Li B H, Xu Y G, An L, et al. Quantum focusing and coherent control of nonresonant two-photon absorption in frequency domain [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2443-2446.
- [27] Li B H, Xu Y G, Zhu H F, et al. Spectral compression and modulation of second harmonic generation by Fresnel-inspired binary phase shaping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(10): 2511-2515.
- [28] Li B H, Xu Y G, Zhu H F, et al. Temporal compression and shaping of chirped biphotons using Fresnel-inspired binary phase shaping [J]. *Physical Review A*, 2015, 91(2): 023827.
- [29] Li B H, Wang D D, Pang H F, et al. Compression of correlation time of chirped biphotons by binary phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(4): 044206.
李百宏, 王豆豆, 庞华锋, 等. 用二元相位调制实现啁啾纠缠光子对关联时间的压缩 [J]. *物理学报*, 2017, 66(4): 044206.
- [30] Sakdinawat A, Liu Y. Soft-X-ray microscopy using spiral zone plates [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2635-2637.