

引用格式: ZHOU Bingjie, MA Jingui, YUAN Peng, et al. Ultrafast Group-velocity Control via Cascaded Optical Parametric Amplification (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(8):0850212

周冰洁, 马金贵, 袁鹏, 等. 基于级联光参量放大的超短脉冲群速度调控(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(8):0850212

基于级联光参量放大的超短脉冲群速度调控 (特邀)

周冰洁^{1,2}, 马金贵¹, 袁鹏¹, 王静¹, 钱列加¹

(1 上海交通大学 物理与天文学院 激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240)

(2 上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘要: 提出并研究了一种宽带、大量程、方向可控的超短脉冲群速度调控方法。利用级联光参量放大, 将泵浦光时域的线性强度调制转移至啁啾信号光频域的线性位相调制, 压缩后信号光脉冲将获得延时或提前。通过调控泵浦时域强度调制的斜率大小和符号, 可对信号光群速度调控的量程和方向进行灵活操控。级联光参量放大过程不需要满足位相匹配, 响应带宽很大, 原理上支持周期量级脉冲的群速度调控。分别研究了锯齿型和高斯型脉冲泵浦的级联光参量放大过程, 演示验证了该方法的调控效果。该方法可在常规非线性晶体中实施, 具备应用价值。

关键词: 非线性光学; 超快群速度调控; 超短脉冲; 光参量过程; 数值模拟

中图分类号: O437.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215008.0850212

Ultrafast Group-velocity Control via Cascaded Optical Parametric Amplification (Invited)

ZHOU Bingjie^{1,2}, MA Jingui¹, YUAN Peng¹, WANG Jing¹, QIAN Liejia¹

(1 Key Laboratory for Laser Plasmas (MOE), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2 Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: A method for ultrafast group-velocity control with simultaneously broad bandwidth, large tuning range, and controllable direction is proposed. By aid of cascaded optical parametric amplification, the linear intensity-modulation of pump will transfer to the linear frequency-phase modulation of chirped signal pulses, enabling the time shift of signal pulses after compression. The tuning range and direction of time shift can be flexibly controlled by tuning the slope of pump modulation. The proposed method supports a large response bandwidth because of no phase-matching requirement, and can control the group velocity for few-cycle pulses in principle. Its feasibility is demonstrated by using both sawtooth-profile and Gaussian-profile pump modulations. It can implement in conventional nonlinear crystals and thus has an application prospect.

Key words: Nonlinear optics; Ultrafast group-velocity control; Ultrashort pulse; Optical parametric process; Numerical simulation

OCIS Codes: 320.7110; 190.4410; 140.7090

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.91850203, 61727820), 上海市青年科技启明星计划(No.21QA1404600)

第一作者: 周冰洁(1987—), 女, 博士后, 主要研究方向为超短脉冲的群速度调控。Email: abing3188@sjtu.edu.cn

通讯作者: 马金贵(1986—), 男, 长聘教轨助理教授, 博士, 主要研究方向为超快非线性光学及高功率激光技术。Email: majg@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-05-25; 录用日期: 2021-07-04

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

真空中的光速是自然界中物质运动、信息传输的速度上限。光的这种超高速传输特性,一方面非常适合用于远距离通信(地球南北两极间的光通信仅需0.067 s),另一方面也使得对光的时域调控变得非常困难。在一些应用场合,需要让光速慢下来。假设光脉冲经过一段介质的时间为 T ,如果通过一定手段对光脉冲群速度进行调控,那么便可形成慢光(群速度变慢, T 变大)或快光(群速度变快, T 变小)。光脉冲的群速度调控既是基础研究的重要内容,也具有广泛的应用价值^[1-4]。比如,慢光可构建全光通信网络的光缓冲、光开关、光存储器件^[5-7],提高干涉仪的灵敏度^[8],增强光与物质相互作用^[9]等。

光脉冲的群速度依赖于材料的色散特性,因此目前绝大多数方法利用共振来实现群速度调控。根据 $n_g = n + \omega(dn/d\omega)$ 和 $v_g = c/n_g$ (式中, n 为折射率, ω 为角频率, c 为真空中光速, n_g 为群折射率, v_g 为群速度),群速度的显著改变均是发生在色散剧烈变化之处,即介质的反常色散区($dn/d\omega < 0$)。根据Kramers - Kronig(K-K)关系,色散的强烈变化均伴随着幅度的显著改变,反常色散对应强吸收。如果光脉冲的频率位于介质的共振吸收区,那么它的群速度会变大,形成快光。但是这个过程中光信号被强烈吸收,应用价值不大。为此,在早期的快慢光研究中,科学家们相继提出了电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)^[10-11]、相干布局数振荡(Coherent Population Oscillation, CPO)^[12-13]等方法,在介质共振吸收区创造一个狭窄的透明窗口。由于共振带宽很窄,这两种方法只适用于毫秒—微秒脉冲的群速度调控。另外,科学家们还可以通过光子晶体来调控介质色散结构,实现快慢光^[14-15]。

与共振吸收对应,共振增益产生的过程也可调控光脉冲的群速度,同时避免了吸收。为与通信系统兼容,科学家们更多地采用光纤中的非线性效应获取增益,典型过程有受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)^[16-17]、受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)^[18-19]和光参量放大(Optical Parametric Amplification, OPA)^[20-21]。这三种非线性过程均需要一束泵浦光对信号光进行调控,当泵浦光与信号光的频率差分别与声频声子(SBS)、光频声子(SRS)和闲频光(OPA)的频率相等时(即满足位相匹配条件),便会创造共振增益。根据K-K关系,共振增益会形成慢光。这类光纤中实现的共振增益适用于对纳秒至亚皮秒脉冲的群速度调控,而且可以通过改变泵浦光强度实现对信号光群延迟量的动态调控。除光纤介质外,共振增益还可发生在啁啾周期性极化的铌酸锂晶体(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN)中,这种方式共振增益带宽可以很大,支持百飞秒脉冲的群速度调控^[22]。

除了共振,非线性级联过程也可用于群速度调控^[23-24]。与共振不同,非线性级联过程是通过作用光波间的“拖拽”或“牵拉”效应实现对信号光的群速度调控,“拖拽”还是“牵拉”取决于作用光波间群速度的相对大小,即群速度失配(Group Velocity Mismatch, GVM)的正负。这种非线性级联过程的响应带宽非常大,可对几十飞秒的脉冲进行调控,但是这种方式往往伴随着脉冲畸变。课题组之前提出的共振级联OPA方式,通过信号光引入啁啾,可减弱脉宽窄化效应,实现高保真度调控^[22]。

本文提出一种适用于飞秒脉冲群速度调控的新方法,物理基础是级联OPA中“泵浦强度调制”到“信号频域位相调制”的转移过程,关键特征是信号光经过啁啾后入射,泵浦光强度随时间线性变化、OPA工作在大位相失配区。在这种级联OPA中,泵浦光时域的线性调制将转移至信号光的频域,压缩后信号光脉冲将获得延时或提前。级联OPA过程不需要满足位相匹配,响应带宽很大,支持几十飞秒脉冲的群速度调控。提到的几种典型方法中,快光和慢光通常发生在不同的物理环境,在不改变晶体色散结构或入射波长的前提下,两者难以同时实现。而在本方法中,通过改变泵浦时域调制的斜率,可改变信号光群速度调控的方向,使得快光、慢光可灵活切换。另外该方法不需要特殊的晶体设计,可在普通非线性晶体中实施,便于应用。

1 群速度调控机理

图1示意了提出的超短脉冲群速度调控的基本过程,物理机制是级联OPA中“泵浦强度调制”到“信号频域位相调制”的转移过程。为便于阐述机理,本部分采用强度随时间完全线性变化的脉冲(即锯齿型脉冲)泵浦级联OPA过程。这种锯齿型泵浦脉冲可以通过相干脉冲堆叠的方法产生^[25-28]。将在第3节说明实际高斯脉冲的上升沿和下降沿也可近似看作锯齿型脉冲。

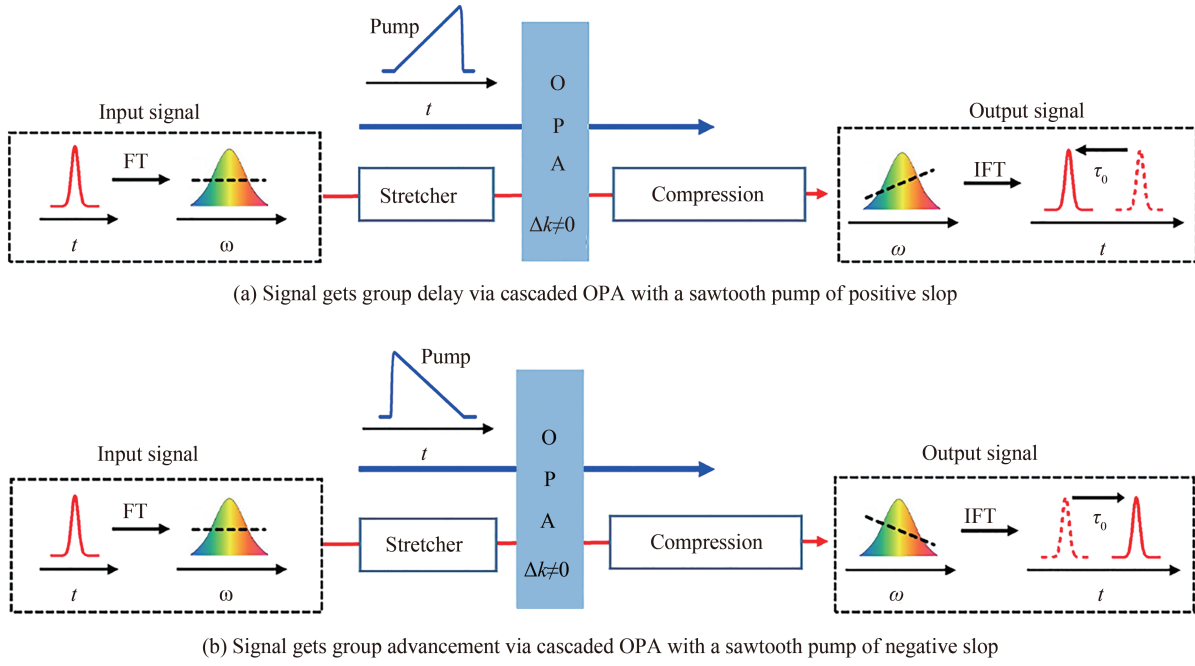


图1 基于级联光参量放大幅-频转移过程的超短脉冲群速度调控机理

Fig. 1 Ultrafast group-velocity control mechanism via amplitude-to-frequency transfer in cascaded OPA

1.1 理论分析

所谓级联 OPA 指的是工作在大位相失配条件 ($\Delta k \gg 2\Gamma$) 下的级联 OPA, 通过不断交替发生 OPA 及其逆过程, 在信号光上积累非线性相移^[29], 即

$$\Delta\varphi^{\text{NL}} = -\Gamma^2 L / \Delta k \quad (1)$$

式中, $\Gamma^2 = \beta I_p$ 为耦合系数, $\beta = 2d_{\text{eff}}^2 \omega_s \omega_i / (c^3 \epsilon_0 n_p n_s n_i)$ 为与晶体特性和作用光波有关的系数, L 为晶体长度, Δk 为三波的波矢失配, d_{eff} 为有效非线性系数, ϵ_0 为真空介电常数, ω_j 和 n_j 分别表示脉冲 j 的角频率和折射率 ($j = p, s, i$ 分别代表泵浦光、信号光和闲频光)。当频域非线性相移呈现出一阶特性时, 可用于调控信号脉冲的群延迟。之前提出的共振级联 OPA 方法中, 泵浦光强 I_p 与晶体长度 L 为定值, 通过操控 Δk 在信号光上引入级联非线性位相进行群速度调控^[22]。本文提出的锯齿脉冲泵浦的级联 OPA 方法, 是将晶体长度 L 和位相失配 Δk 固定, 通过操控泵浦光的强度分布 $I_p(t)$ 来实现超短脉冲的群速度调控; 在级联 OPA 作用下, 泵浦光的强度调制可以转换为信号光的频域位相调制。

假设泵浦光为强度随时间线性变化的锯齿脉冲, 强度分布形式为

$$I_p(t) = I_{p0} + \alpha t \quad (2)$$

式中, α 为锯齿脉冲的调制斜率, 由泵浦光脉宽范围 $\Delta\tau_p$ 内的强度变化 ΔI_p 决定, 即 $\alpha = \Delta I_p / \Delta\tau_p$, 当 ΔI_p 随时间从小变到大时, α 为正, 反之为负; I_{p0} 为 $t=0$ 时刻的泵浦强度。在式(2)所示的锯齿型脉冲作用下, 信号光上将积累随时间线性变化的非线性位相, 即

$$\Delta\varphi^{\text{NL}}(t) = -\frac{(I_{p0} + \alpha t)\beta L}{\Delta k} \quad (3)$$

为了将此时域位相调制转移为频域位相调制, 将超短信号脉冲变成啁啾脉冲后入射, 啁啾信号脉冲的频率与时间的转换关系为 $\omega_s = \omega_{s0} + C_0 t$, C_0 为映射系数, 将 $t = (\omega_s - \omega_{s0}) / C_0$ 代入式(3)得

$$\Delta\varphi^{\text{NL}}(\omega_s) = -\left[I_{p0} + \frac{\alpha(\omega_s - \omega_{s0})}{C_0} \right] \frac{\beta L}{\Delta k} \quad (4)$$

显然, 信号光上叠加了一阶非线性光谱位相, 此位相源于泵浦光的一阶强度调制。对式(4)求频率的一阶导数, 得延迟量为

$$\Delta t_d = -\frac{d\Delta\varphi^{\text{NL}}(\omega_s)}{d\omega_s} = \frac{\alpha \beta L}{C_0 \Delta k} \quad (5)$$

习惯上,啁啾信号脉冲常用形如 $E_s(t)=E_{s0}\exp[-0.5(1-iC_s)(t/T_s)^2]$ 的表达形式, C_s 为啁啾系数, T_s 为信号脉冲的 $1/e$ 半宽,因此有 $C_0=C_s/T_s^2$ 。在大啁啾系数近似下, $C_s\approx\Delta\omega_s T_s$, $\Delta\omega_s$ 为信号脉冲的光谱宽度,此时式(5)可表示为

$$\Delta t_d = \frac{\alpha C_s \beta L}{\Delta\omega_s^2 \Delta k} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,在晶体长度 L 和位相失配 Δk 固定的情况下,延迟量的大小和方向由泵浦强度调制斜率 α 和信号啁啾系数 C_s 决定。 α 或 C_s 变大,延迟量变大, α 或 C_s 符号改变,延迟方向改变,延迟和提前之间实现切换。理论分析过程表明,通过级联OPA过程,泵浦光的时域强度调制可以转化为信号光的频域位相调制,从而可以通过调控时域泵浦脉冲的参数来调控信号光的群速度。另外,由于OPA工作在大位相失配区,信号光没有增益,因此信号光可以全带宽通过,意味着该方法可支持更短飞秒脉冲的群速度调控。

这种利用级联OPA中“泵浦强度调制”转移至“信号频域位相调制”的调控方法与文献[22]提出的共振级联OPA方法存在几点不同:1)本方法中,三波在整个晶体长度内均工作于大位相失配区($\Delta k \gg 2\Gamma$),因此信号光的增益或者放大效率可忽略不计;而文献[22]的方法依赖于啁啾准位相匹配晶体,存在位相匹配区域($\Delta k=0$),具有较高的小信号增益;这种特性使得本方法的调控带宽大于之前的方法。2)本方法中,延时量的大小与泵浦强度调制斜率 α 成正比,而与泵浦强度绝对值 I_{p0} 无关(当然 I_{p0} 也不能很大,否则会破坏大位相失配条件 $\Delta k \gg 2\Gamma$);而文献[22]的方法中,延时量大小与泵浦光的强度成正比关系。3)本方法中,延时与提前的切换可通过改变泵浦强度调制斜率 α 实现;而文献[22]的方法中该功能只能通过改变三波群速度失配的正负号实现,难以在单块晶体内完成。

1.2 数值模拟

数值模拟中,如无特殊说明,采用以下基本参数设置:泵浦激光波长为532 nm,锯齿型脉冲,底宽 $\tau_p=30$ ps,强度变化范围为0~20 GW/cm²;信号脉冲中心波长为1 550 nm,高斯脉冲,半高全宽 $\tau_0=100$ fs,采用正啁啾展宽(C_s 为正),展宽后啁啾脉冲宽度 $\tau_s=10$ ps(半高全宽),强度 $I_{s0}=10^{-10}I_{pmax}$ (I_{pmax} 为锯齿脉冲的最大强度);晶体选用 β -BBO,晶体长度 $L=15$ mm;I类OPA,位相匹配角 $\theta_{pm}=22.1^\circ$ 。当泵浦光与晶体光轴的夹角 θ 偏离位相匹配角时,三波之间会产生波矢失配 Δk_0 。计算中设定 $\theta=22.4^\circ$,对应中心波长波矢失配 $\Delta k_0=-5 620$ rad/m,满足 $|\Delta k/2\Gamma_{max}|>1$ (Γ_{max} 为 I_{pmax} 条件下计算所得),即所有信号频率成分均处于大位相失配区。为突出调控机理和演变特性,数值模拟中暂时忽略晶体色散的影响。色散对群速度调控的影响在2.2节具体讨论。

首先模拟了正斜率调制(强度随时间增加)锯齿脉冲泵浦的情况。如图2(a)所示,锯齿脉冲采用 $I_p(t=-\tau_p/2)=0$ GW/cm², $I_p(t=\tau_p/2)=20$ GW/cm²的分布。经过级联OPA后,信号光上积累了斜率为正的一阶非线性光谱位相,如图2(b)红色虚线所示。该位相可使压缩信号脉冲获得延迟,在当前参数条件下,信号延迟达到165 fs,对应比例延迟为1.65,明显超过了入射脉冲宽度[图2(c)]。同时,锯齿脉冲强度的线性分布保证了延迟信号脉冲良好的保真度(即输出脉冲与输入脉冲的脉宽比值),输出脉宽为104 fs,对应保真度为1.04,接近1的理想状态。

改变锯齿脉冲的调制斜率,可将信号延迟切换为提前。如图2(d)~(f)所示,泵浦光强度采用 $I_p(t=-\tau_p/2)=20$ GW/cm², $I_p(t=+\tau_p/2)=0$ GW/cm²的分布。在其他参数条件不变的情况下,信号光上产生了斜率为负的一阶非线性光谱位相和群提前,实现了延迟方向的改变。除了延迟方向改变,提前量的大小和脉冲保真度均未发生变化。以上模拟结果表明,该方法不仅可以使飞秒脉冲获得大于脉冲宽度的时间偏移,还可以兼容延迟和提前,两者的切换仅需改变锯齿脉冲的调制斜率符号即可。另外,改变信号脉冲的啁啾系数符号或中心波长位相失配的符号也可改变群速度的调控方向,这里不再详细说明。

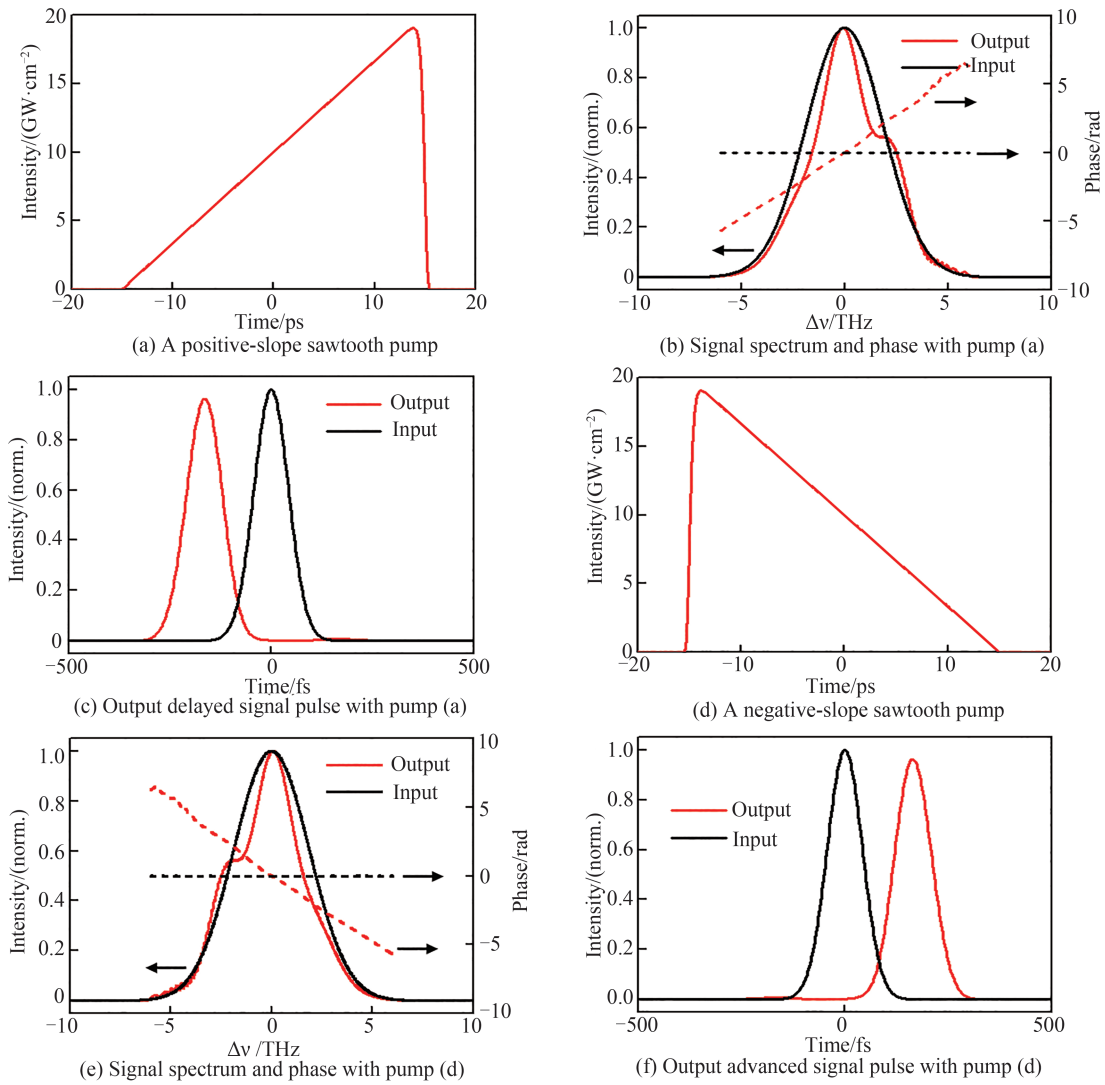


图2 利用锯齿脉冲泵浦的级联OPA进行群速度调控的数值模拟结果

Fig. 2 Group-velocity-control simulations for the signal from a sawtooth-pulse-pumped cascaded OPA

2 调控特性

2.1 调谐特性

根据式(6),级联OPA过程产生的群延迟主要是与锯齿脉冲的调制斜率和信号光的啁啾系数有关。调制斜率由泵浦光的脉宽 τ_p 和强度变化范围 ΔI_p 决定,啁啾系数由展宽信号的脉宽 τ_s 决定,因此产生的群延迟可以通过 ΔI_p 、 τ_p 和 τ_s 等变量进行调谐。如图3,本节仅以正斜率调制的锯齿脉冲为例进行说明,负斜率调制的情况,除了延迟方向相反外,其他可调谐特性均与正斜率调制相同(前提是不考虑晶体色散)。另外,为了描述方便,将 $t = -\tau_p/2$ 时的光强定义为 I_{pmin} ,将 $t = \tau_p/2$ 时的光强定义为 I_{pmax} 。图3中每幅小图的计算仅改变横坐标一个参数,其它参数与图2相同。

首先,讨论 I_{pmin} 的变化(其余变量 I_{pmax} 、 τ_p 和 τ_s 固定)对群延迟调控的影响[图3(a)]。随着 I_{pmin} 的增加,锯齿脉冲调制斜率减小,泵浦脉冲形状逐渐从锯齿型过渡为台阶型最终变为平顶型。这一过程中,延迟量逐渐减小,当泵浦脉冲变为平顶型时,延迟量减小为0,级联OPA过程对信号光不再具有调控效果。这是因为平顶型的泵浦脉冲只能在信号光上产生零阶的光谱位相,因而无法产生延迟。同样地,改变 I_{pmax} 也能调控延迟量的大小[图3(b)],随着 I_{pmax} 的增加,延迟量线性增加,因为非线性耦合效应增强,从而促使级联非线性相移增大。在泵浦强度变化范围确定的情况下,较短的泵浦脉宽更有利于大延迟量的产生。因为泵浦脉宽越短,调制斜率越大,延迟量越大[图3(c)]。另外,模拟结果还表明,无论是改变 I_{pmin} 、 I_{pmax} 还是 τ_p ,都不会对延迟脉冲的保真度造成明显影响。

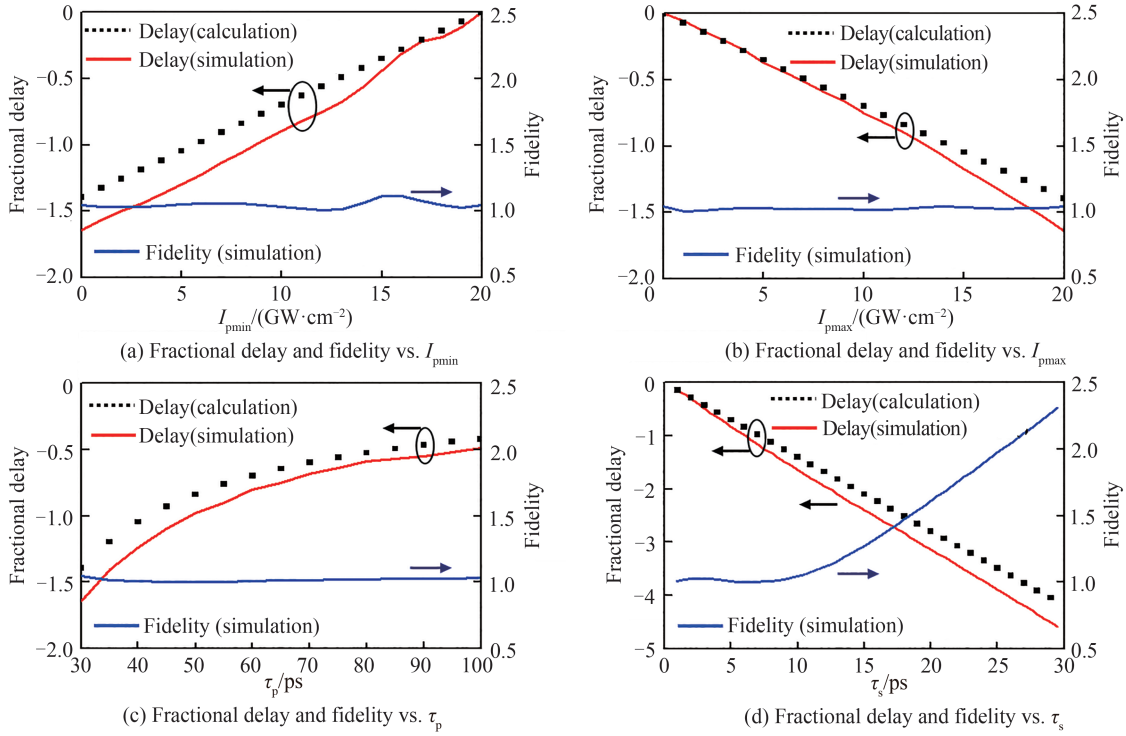


图3 比例群延时和脉冲保真度随级联OPA输入参数的变化关系
Fig. 3 Dependence of fractional delay and fidelity on different input parameters of cascaded OPA

以上讨论均为通过改变泵浦调制斜率实现的群延迟调谐,下面讨论调制斜率固定的情形下,信号光啁啾展宽量对群延迟的影响。由于信号光展宽量决定着信号光谱能够感应到的真实泵浦调制斜率,因而也可用于群延迟量的调谐。如图3(d)所示,延迟量随啁啾展宽的增加而增加,在 $\tau_s=30$ ps时,比例延迟可达4.5。然而,随着展宽量的增加,保真度出现严重下降,原因是出现了光谱窄化。这表明,信号脉宽与泵浦脉宽的比值存在一个最佳值,过大会造成保真度下降,过小会影响大延迟产生。从模拟结果显示,这个比值大约在0.3时较为合适,即 $\tau_s=10$ ps时。同时,在图3的模拟中给出了利用式(5)计算的群延迟(黑色方块)。计算结果表明,理论计算与数值模拟具有一致的演变特性,且在 I_{pmax} 不超过 10 GW/cm²的时候,两者基本重合[图3(b)]。模拟结果表明,调控不再需要信号光与闲频光间的群速度失配(GVM_{si})作为必要条件,因此在简并级联OPA中也能实现群速度调控。

2.2 色散影响

实际调控过程中,晶体色散的影响不可忽略。色散不仅会影响脉冲的时域分布,而且会改变三波间的波矢失配。比如,信号光与泵浦光间的群速度失配 GVM_{sp} 会影响相互作用脉冲间的重叠情况,信号光与闲频光间的群速度失配 GVM_{si} 会导致随频率线性变化的波矢失配并产生额外的级联非线性位相,群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD)会导致压缩脉冲展宽等,这些都会对群速度调控的效果和脉冲保真度造成影响。其中, GVM_{si} 的影响最为严重。

通过数值模拟对以上分析进行说明。图4中, Γ 为最大泵浦强度(I_{pmax})对应的耦合系数,色散包含 GVM_{sp} 、 GVM_{si} 、 GVD_s 以及 GVD_i ,其它计算参数与图2相同。当泵浦光采用正斜率调制的锯齿脉冲进行群延迟调控时,色散的存在会导致延迟量降低[图4(a)]。这是因为负的 GVM_{si} 在级联OPA作用下产生了群提前调控,当其与正斜率锯齿脉冲引起的群延迟调控共同存在时,两者相互抵消,导致延迟量下降。但仍可以在 $-1.5 < \Delta k_0/2\Gamma < -1$ 的范围内获得超过脉冲脉宽的群延迟。延迟量下降的原因也可从级联非线性位相的角度进行解释:根据公式 $\Delta\varphi^{NL} = -\Gamma^2 L/\Delta k$,级联非线性位相的频域分布由比值 $\Gamma(\omega)^2/\Delta k(\omega)$ 决定。在目前的情形下,对应高泵浦光强的频率成分同时对应大位相失配,对应低泵浦光强的频率成分同时对应小位相失配,使得比值 $\Gamma(\omega)^2/\Delta k(\omega)$ 在整个光谱范围内趋于平缓,从而产生较为平坦的光谱位相,降低群延迟。

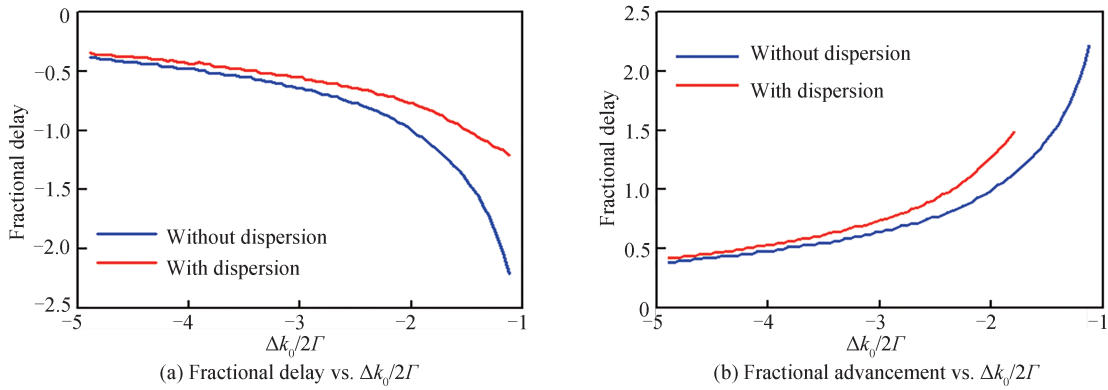


图4 不同波矢失配下色散对群速度调控的影响

Fig. 4 Effect of dispersion on group velocity control under different wave-vector mismatch

反之,当泵浦光采用负斜率调制的锯齿脉冲进行群提前调控时,色散的存在会使得提前量增加[图4(b)].但需要注意的是,群提前调控的实现需要工作在中心波长波矢失配更大的条件下,比如 $\Delta k_0/2\Gamma < -1.8$ 的范围。因为此时接近位相匹配的频率成分对应较高的泵浦光强调制,若中心波矢失配不够大,这些 $|\Delta k(\omega)/2\Gamma(\omega)| \leq 1$ 的频率成分将有可能获得放大而导致信号光谱偏移和窄化,使调控偏离预期。另外,无论延迟还是提前,调控符号均未发生变化,仍由锯齿脉冲调制斜率的符号决定。需要指出,在种子光脉宽为100 fs时,GVM_{sp}和GVD的影响几乎可以忽略。大量的数值计算表明,GVM_{sp}和GVD既不会影响延迟量的大小,也不会改变延迟的符号。

2.3 更短脉冲的调控

随着脉宽的进一步减小,色散的影响将变得严重。种子光为100 fs时,GVM_s虽然会导致延迟量降低,但仍能获得与脉冲宽度相当的延迟量[图4(a)].但对于带宽更大的超短脉冲,比如脉宽为30 fs的种子光,这一结论将不再成立。由于30 fs种子光的带宽比100 fs宽很多,当级联OPA仍工作在 $\Delta k_0 = -5620$ rad/m的条件下时,会有部分信号频率接近位相匹配而获得放大,导致信号光谱发生严重偏移和窄化[图5(a)].此时,虽然信号脉冲仍可以获得大的群延迟[图5(b)],但明显的脉冲展宽和中心波长偏移使得调控不再具有意义。为了避免这一现象的发生,需要增加中心波长波矢失配的量值,以确保所有信号频率均可以工作在大位相失配区域($|\Delta k(\omega)/2\Gamma(\omega)| > 1$)。

以30 fs超快激光为例,信号光谱不发生频移和窄化需要 Δk_0 的绝对值至少应大于7500 rad/m[图5(c)].然而,波矢失配的增加同时会导致级联非线性效应减弱,从而延迟量下降,群延迟调控效果减弱。如图5(c)和图5(d)所示,在当前模拟参数条件下,非线性光谱位相接近0,群延迟仅为-2.7 fs。在此基础上,减小 Δk_0 易引起因部分频率放大导致的光谱偏移,增大 Δk_0 会使得群延迟继续减少甚至出现群提前现象。因此,在正斜率调制的锯齿脉冲作用下,新方案并不适用于少周期飞秒脉冲的群延迟调控。

反之,少周期脉冲的群提前调控基本不受影响。在负斜率调制锯齿脉冲的作用下,30 fs的超快激光可以获得与脉冲宽度相当的群提前。为了保证信号光谱的高保真,中心波长波矢失配需设置为更大的量值,如 $\Delta k_0 = -12245$ rad/m。在该 Δk_0 作用下,信号脉冲获得了30 fs的群提前,但保真度下降为1.3[图5(f)].保真度下降的主要原因是GVD引起的二阶非线性光谱位相[图5(e)],可通过优化压缩器进行补偿。综上,在种子光脉宽下降至30 fs和GVM_s为负的情形中,仅能采用负斜率调制的锯齿脉冲进行群提前调控。反之,在GVM_s为正的情形中,仅能采用正斜率调制的锯齿脉冲进行群延迟调控。随着信号带宽的增加,新方法不再兼容延迟和提前,但仍能对其中一种情形进行调控。

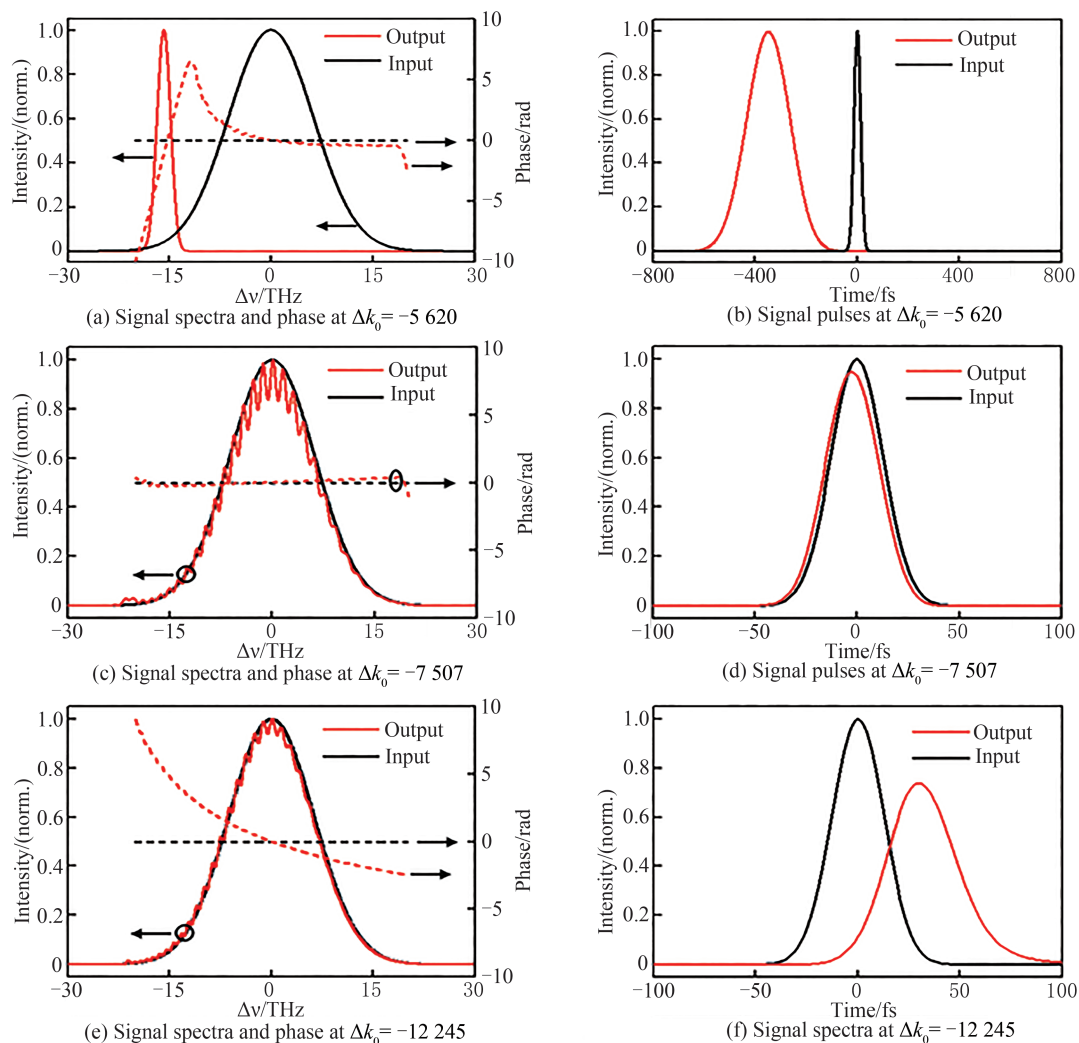


图5 对30 fs脉冲的群速度调控效果
Fig.5 Group velocity control for a 30-fs pulse

3 高斯脉冲泵浦

锯齿脉冲泵浦的级联OPA可以调控超短脉冲的群速度。高斯脉冲前后沿的强度也具有良好的线性度,针对能否利用高斯脉冲泵浦级联OPA进行超快群速度调控的问题做了模拟研究。模拟中采用如图6(a)和图6(d)所示的高斯泵浦脉冲,半高全宽为30 ps,峰值强度为20 GW/cm²;啁啾信号脉冲半高全宽为10 ps,峰值强度为2 W/cm²;晶体角度 $\theta=22.5^\circ$,对应中心波长波矢失配 $\Delta k_0 = -7\,505$ rad/m。采用信号光的脉冲峰值位置为时间零点,泵浦光向前或向后偏移以使其后沿或前沿对准信号脉冲的峰值。这里以信号光与泵浦光错开15 ps为例进行说明。

首先看信号脉冲与高斯泵浦脉冲后沿对准的情况[图6(a)]。经过级联OPA后,信号光获得了与图2(b)和图2(c)类似的非线性光谱位相[图6(b)]和时间延迟[图6(c)]。在当前参数条件下,延迟量为-107 fs,对应比例延迟为1.07,保真度为1.08。该结果表明,高斯泵浦脉冲的后沿可以充当正斜率调制锯齿脉冲的作用,实现信号脉冲的群延迟调控。同样地,高斯泵浦脉冲的前沿也可用来提供信号脉冲的群提前调控[图6(d)]。计算结果表明,当信号脉冲对准高斯泵浦脉冲的前沿时,信号光上可以获得与图2(e)和图2(f)类似的非线性光谱位相[图6(e)]和时间提前[图6(f)],提前量为186 fs,对应比例提前为1.86,保真度为1.47。群提前大于群延迟的原因同样是因为负的GVM_{si}在级联OPA作用下产生了一定量的群提前。结果表明,在缺少锯齿脉冲调制器的情况下高斯型泵浦脉冲可以作为更加便捷的替代方案。

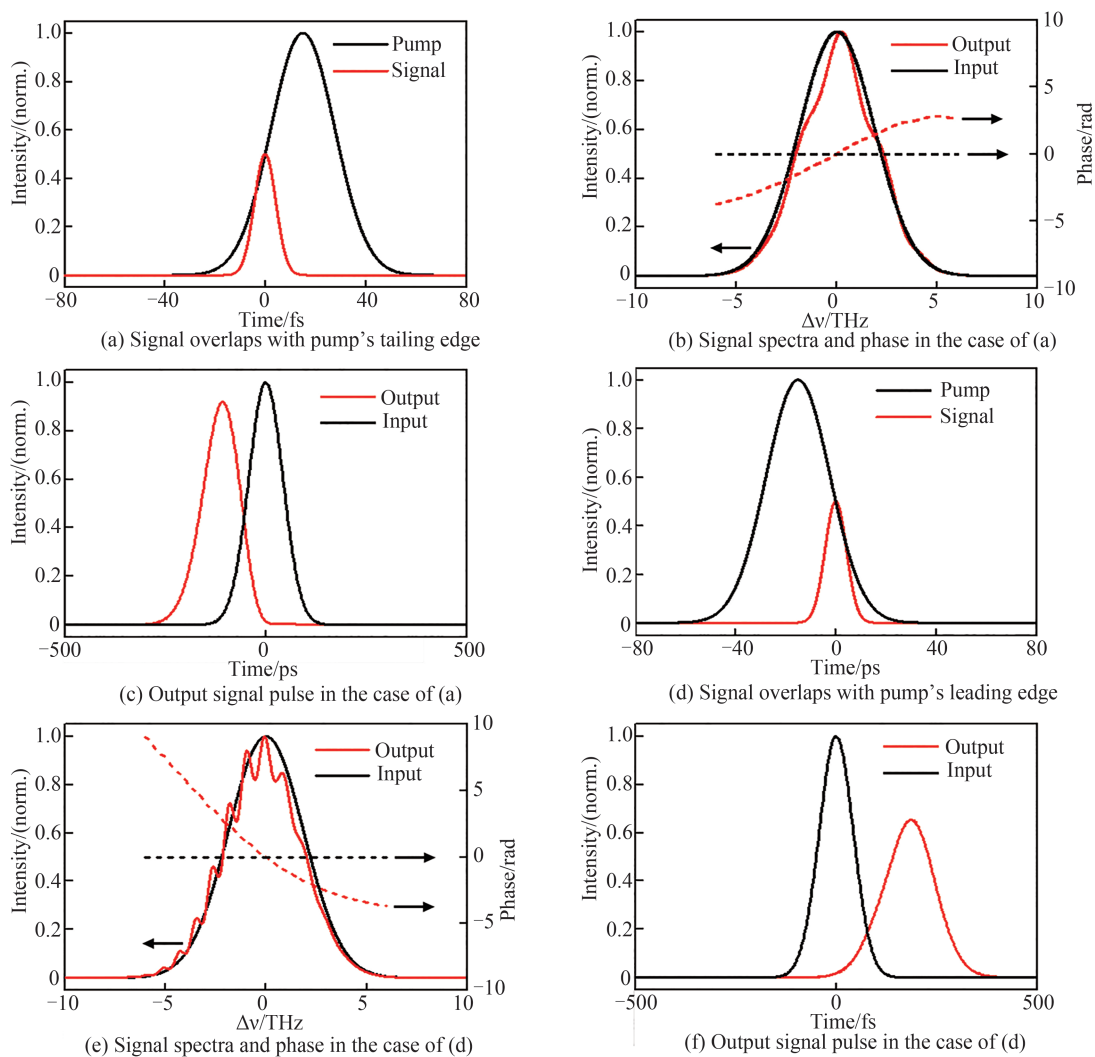


图6 利用高斯脉冲泵浦的级联OPA进行群速度调控的数值模拟结果

Fig. 6 Group-velocity-control simulations for the signal from a Gaussian-pulse-pumped cascaded OPA

4 结论

本文提出了一种基于级联OPA的超短脉冲群速度调控方法,物理机制是“泵浦强度调制”转移至“信号频域位相调制”的过程,关键特征是泵浦光强度随时间线性变化、信号光经过啁啾后入射。在这种级联OPA中,泵浦光时域的强度线性调制转移至信号光的频域位相调制,压缩后信号光脉冲相对直接透过时间将获得时移,时移的方向(延时或提前)可由泵浦光强度的调制斜率来动态调控。级联OPA过程工作在大位相失配区,不需要满足位相匹配条件,这种特性一方面拓展了响应带宽,支持少周期脉冲的群速度调控;另一方面对晶体的设计要求大大降低,可在常规非线性晶体中实施。值得一提的是,之前提出的多级串联构型^[30],同样适用于本文提出的方法,从而可进一步拓展调控量程。这种大带宽、大量程和方向可控的群速度调控方法将在全光通信等方面具备应用前景。

参考文献

- [1] KRAUSS T F. Why do we need slow light?[J]. Nature Photonics, 2008, 2: 448-450.
- [2] MOK J T, EGGLETON B J. Expect more delays[J]. Nature, 2005, 433: 811-812.
- [3] BORTOLOZZO U, RESIDORI S, J-PHUIGNARD. Slow and fast light: basic concepts and recent advancements based on nonlinear wave-mixing processes[J]. Laser & Photonics Reviews, 2010, 4(4): 483-498.
- [4] THÉVENAZ L. Slow and fast light in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2008, 2: 474-481.
- [5] PARRA E, LOWELL J R. Toward applications of slow light technology[J]. Optics and Photonics News, 2007, 18(11): 40-45.
- [6] BOYD R W, GAUTHIER D J, GAETA A L. Applications of slow light in telecommunications[J]. Optics and Photonics

- News, 2006, 17(4): 18-23.
- [7] BOYD R W. Slow and fast light: fundamentals and applications[J]. Journal of Modern Optics, 2009, 56(18-19): 1908-1915.
- [8] SHI Z, BOYD R W, CAMACHO R M, et al. Slow-light Fourier transform interferometer[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(24): 240801.
- [9] SOLJAČIĆ M, JOANNOPOULOS J D. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals[J]. Nature Materials, 2004, 3: 211-219.
- [10] HARRIS S E. Electromagnetically induced transparency[J]. Physics Today, 1997, 50(17): 36-42.
- [11] VESTERGAARD L, HARRIS S E, DUTTON Z, et al. Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas[J]. Nature, 1999, 397: 594-598.
- [12] BIGELOW M S, LEPESHKIN N N, BOYD R W. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(11): 113903.
- [13] BIGELOW M S, LEPESHKIN N N, BOYD R W. Superluminal and slow light propagation in a room temperature[J]. Science, 2003, 301: 200-202.
- [14] BABA T. Slow light in photonic crystals[J]. Nature Photonics, 2008, 2: 465-473.
- [15] VLASOV Y A, O'BOYLE M, HAMANN H F, et al. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides[J]. Nature, 2005, 438: 65-69.
- [16] OKAWACHI Y, BIGELOW M S, SHARPING J E, et al. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 153902.
- [17] SONG K Y, HOTATE K. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. Optics Letters, 2007, 32(3): 217-219.
- [18] SHARPING J E, OKAWACHI Y, GAETA A L, et al. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier[J]. Optics Express, 2005, 13(16): 6092-6098.
- [19] BUSTARD P J, HESHAMI K, ENGLAND D G, et al. Raman-induced slow-light delay of THz-bandwidth pulses[J]. Physical Review A, 2016, 93: 043810.
- [20] DAHAN D, EISENSTEIN G. Tunable all optical delay via slow and fast light propagation in a Raman assisted fiber optical parametric amplifier: a route to all optical buffering[J]. Optics Express, 2005, 13: 6234-6249.
- [21] SHUMAKHER E, WILLINGER A, BLIT R, et al. Large tunable delay with low distortion of 10 Gbit/s data in a slow light system based on narrow band fiber parametric amplification[J]. Optics Express, 2006, 14(19): 8540-8545.
- [22] ZHOU B J, MA J G, WANG J, et al. Ultrafast group-velocity control via cascaded quadratic nonlinearities in optical parametric amplification[J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3790-3793.
- [23] MARANGONI M, MANZONI G, RAMPONI R, et al. Group-velocity control by quadratic nonlinear interactions[J]. Optics Letters, 2006, 31(4): 534-536.
- [24] LU W, CHEN Y, MIU L, et al. All-optical tunable group-velocity control of femtosecond pulse by quadratic nonlinear cascading interactions[J]. Optics Express, 2008, 16(1): 355-361.
- [25] FÜLÖP J A, MAJOR ZS, HORVÁTH B, et al. Shaping of picosecond pulses for pumping optical parametric amplification[J]. Applied Physics B, 2007, 87: 79-84.
- [26] PARK Y, ASGHARI M H, AHN T J, et al. Transform-limited picosecond pulse shaping based on temporal coherence synthesization[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9584-9599.
- [27] LIU F, HUANG S, SI S, et al. Generation of picosecond pulses with variable temporal profiles and linear polarization by coherent pulse stacking in a birefringent crystal shaper[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1467-1478.
- [28] POWER J G, JING C. Temporal laser pulse shaping for RF photocathode guns: the cheap and easy way using UV birefringent crystals[C]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1086: 689-694.
- [29] ZHOU B J, MA J G, WANG J, et al. Nonlinear spectral phase induced by optical parametric chirped-pulse amplification[J]. Physical Review A, 2017, 95: 033841.
- [30] ZHOU B J, MA J G, WANG J, et al. Large magnitude, sign controllable, ultrafast group-velocity control via resonant cascaded nonlinearity in tandem[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29756-29765.