

# 提升超短脉冲激光信噪比的啾啾匹配光参变啾啾脉冲放大新方法

曾曙光<sup>1</sup> 张 彬<sup>1</sup> 李现华<sup>1</sup> 孙年春<sup>1</sup> 隋 展<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 提出了一种利用啾啾匹配光参变啾啾脉冲放大(OPCPA)来提高超短脉冲激光信噪比(SNR)的方法。通过与传统的光参变啾啾脉冲放大方案对比,发现啾啾匹配的光参变啾啾脉冲放大方案可以更好地提高信噪比,同时保持较高的转换效率。利用满足啾啾匹配条件的啾啾参数的计算方法,分析了非线性晶体长度、噪声带宽、抽运啾啾大小以及抽运光信号光同步程度等因素对信噪比提升效果的影响。

**关键词** 光参变啾啾脉冲放大;啾啾匹配;信噪比;转换效率

中图分类号 O437.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0719001

## A New Method Using Chirp-Matching OPCPA Scheme for Improving Signal-to-Noise Ratio of Ultrashort Laser Pulse

Zeng Shuguang<sup>1</sup> Zhang Bin<sup>1</sup> Li Xianhua<sup>1</sup> Sun Nianchun<sup>1</sup> Sui Zhan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)  
(<sup>2</sup> Laser Fusion Research Center of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** A method using chirp-matching optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) scheme to improve the signal-to-noise ratio (SNR) of ultrashort laser pulse is proposed. Comparing the chirp-matching OPCPA scheme with the usual OPCPA scheme, it is shown that the chirp-matching OPCPA scheme can improve significantly the SNR of ultrashort laser pulse, and obtain high conversion efficiency simultaneously. The method for determining the chirp parameter which satisfies the chirp-matching condition is presented. The effects of the crystal length, the noise bandwidth, the pump chirp, as well as the synchronization of signal and pump pulses on the improvement of SNR are also analyzed by numerical simulation.

**Key words** optical parametric chirped pulse amplification; chirp matching; signal-to-noise ratio; conversion efficiency

**OCIS codes** 190.4970; 320.1590; 320.5550

## 1 引 言

近年来,高功率超短脉冲激光技术发展迅速。目前,人们已采用啾啾脉冲放大<sup>[1]</sup>(CPA)技术获得了峰值功率高达拍瓦量级的飞秒激光脉冲,经过聚焦后,其光场强度可达  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>[2]。由此获得的

光场强度数百倍甚至数百万倍于原子内电场强度,从而可提供极端的物理条件,为人类探索未知世界提供了强有力的手段。然而,现有的高功率短脉冲激光系统中,信噪比(SNR)不够高的问题比较突出。从激光技术角度看,信噪比因素是一个总体性的技

收稿日期: 2011-01-15; 收到修改稿日期: 2011-03-10

基金项目: 国家高技术发展计划项目(JG2009039)资助课题。

作者简介: 曾曙光(1984—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲传输和放大等方面的研究。

E-mail: zengshuguang19@sohu.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事光物理和技术等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com

术问题,它将影响超高功率 CPA 激光系统的总体技术方案<sup>[3]</sup>。

目前,人们已提出了一些提高激光脉冲信噪比度的方法,例如可饱和吸收体法<sup>[4]</sup>、电光开关法<sup>[5]</sup>、非线性滤波法<sup>[6]</sup>和光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)法<sup>[7]</sup>等。上述方法均有着各自的优缺点,其中,可饱和吸收体法会导致光束空间轮廓的变形;电光开关法只能消除主脉冲前沿几个纳秒量级的噪声,而对几个皮秒到纳秒量级的噪声却无能为力;非线性滤波在啁啾脉冲压缩后使用,存在非线性效应强、转换效率低、不能级联使用和光路调整复杂等问题;光参变啁啾脉冲放大法虽然可以很好地抑制抽运脉冲时间窗口外的噪声,但对窗口内的噪声却无能为力。

近年来,Ross 等提出了一种啁啾匹配 OPCPA 方案<sup>[8]</sup>,以增加光参变啁啾脉冲放大过程的增益带宽。在该方案中,宽带抽运光和信号光的啁啾准确匹配,以确保它们的瞬时频率在任意时刻均能满足相位匹配条件。对于啁啾匹配方案,就抽运光脉冲的某一时刻而言,其相应的瞬时增益谱取决于该时刻的抽运光波长<sup>[9]</sup>。因此,对于啁啾匹配方案而言,只有落在瞬时增益谱以内的小部分噪声能得到放大,而信号光则因其时刻满足相位匹配关系,而总能得到有效放大。

利用啁啾匹配 OPCPA 方案的特点,本文提出利用啁啾匹配 OPCPA 方案实现超短脉冲信噪比提升的方法,并分析了非线性晶体长度、抽运光信号光啁啾匹配程度、噪声带宽大小、抽运光和信号光同步程度等因素对信噪比提升效果以及转换效率的影响。此外,还将啁啾匹配 OPCPA 方案和传统的非共线 OPCPA 方案的信噪比提升效果进行了对比。

## 2 基本原理

光参变过程可由如下耦合波方程组来描述<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial E_s}{\partial z} = i \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{n_s c} E_p E_i^* \exp(i\Delta k z), \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} = i \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{n_i c} E_p E_s^* \exp(i\Delta k z), \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} = i \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{n_p c} E_s E_i \exp(-i\Delta k z), \end{cases} \quad (1)$$

式中  $E_j, \omega_j, n_j (j = s, i, p)$  分别代表信号光、闲频光和抽运光的电场强度、频率和折射率;  $c$  为真空中的光速;  $d_{\text{eff}}$  表示三波作用下晶体的有效非线性系数;  $\Delta k$  为三波耦合时的相位失配量。若信号光与抽运光、闲频光与抽运光之间的夹角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ , 则相

位失配量  $\Delta k$  可以表示为

$$\Delta k = k_p - k_s \cos \alpha - k_i \cos \beta, \quad (2)$$

式中  $k_p, k_s, k_i$  分别为抽运光、信号光和闲频光的波矢。

图 1 给出了 BBO 晶体(偏硼酸钡)在抽运波长为 516, 524, 532, 540 和 548 nm 时的共线增益谱和抽运波长为 532 nm 时的非共线增益谱(此处计算为输出光功率与输入光功率之比)。共线情况下,非共线角  $\alpha$  和  $\beta$  均为  $0^\circ$ , 相位匹配角为  $22.1^\circ$ ; 非共线情况下, 相位匹配角为  $23.8^\circ$ , 非共线角  $\alpha = 2.38^\circ$ , 非共线角  $\beta = 4.73^\circ$  (以下同)。抽运光强为  $1 \text{ GW/cm}^2$ , BBO 晶体长度为  $0.80 \text{ cm}$ 。从图 1 可以看出, BBO 的共线增益谱很窄, 且当抽运光中心波长不同时, 信号光的共线增益谱中心位置亦不同, 但其峰值大小基本一致; 当非共线角  $\alpha = 2.38^\circ$  时, 信号光的增益带宽很宽, 接近  $200 \text{ nm}$ 。共线条件下, 满足相位匹配条件的信号光中心频率随抽运光中心频率的变化如图 2 所示, 图中计算数据为小信号近似下 BBO 第一类光参变放大的结果, 图 2 相应的相位匹配角亦为  $22.1^\circ$ 。由图 2 可知, 对于任一信号光频率, 存在一最佳的抽运光频率与之对应; 在抽运光中心频率  $3.54 \text{ fs}^{-1}$  (相应波长  $532 \text{ nm}$ ) 附近, 线性及非线性拟合的结果与原始数据非常一致; 而偏离中心频率较远时, 线性拟合曲线与原始数据偏离较大, 而非线性拟合的结果与原始数据则较为一致。由此可见, 对于啁啾补偿方案, 严格地说, 当抽运光为线性啁啾脉冲时, 信号光必须是非线性啁啾的。但如果信号光的谱宽不很宽(谱宽在  $10 \text{ nm}$  量级或以下)时, 信号光仍然可以按线性啁啾近似处理。通常, 非线性啁啾可由棱镜对来实现<sup>[9]</sup>。本文主要讨论线性啁啾匹配方案(以下简称为啁啾匹配方案)。

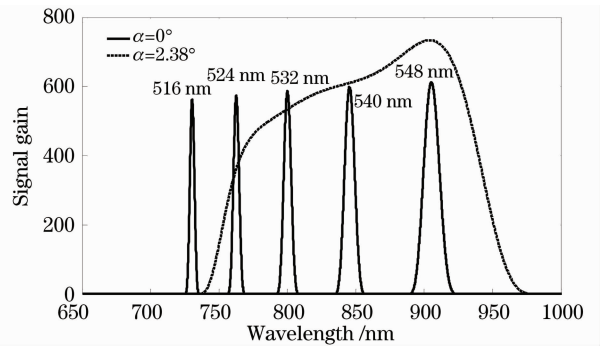


图 1 不同抽运波长时的 BBO 晶体共线增益谱(实线)和抽运波长为 532 nm 时的非共线增益谱(虚线)  
Fig. 1 Collinear gain spectrum of BBO crystal for different pump wavelengths (solid) and noncollinear gain spectrum pumped by 532 nm (dashed)

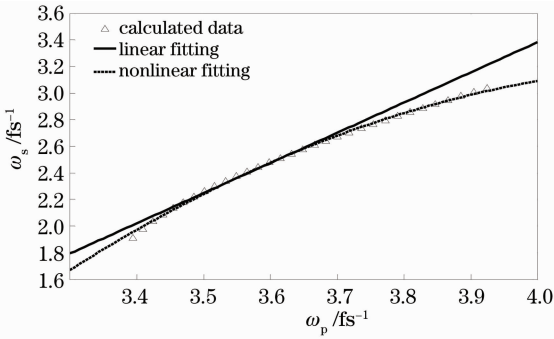


图2 满足相位匹配条件的信号光中心频率随抽运光中心频率的变化

Fig.2 Variation of signal central angular frequency with pump central angular frequency to maintain phase matching for a collinear BBO chirp compensation scheme

根据线性拟合的结果,满足相位匹配条件的信号中心频率与抽运中心频率有如下关系:

$$\omega_s = A \omega_p + B, \quad (3)$$

式中  $A$  和  $B$  为线性拟合系数。例如抽运光在 532 nm 附近时,  $A=2.27, B=-5.70 \text{ fs}^{-1}$ 。

假定抽运光是线性啁啾的,其瞬时频率可表示为

$$\omega_p(t) = \omega_{p0} + b_p t, \quad (4)$$

式中  $\omega_{p0}=0$  时刻的抽运频率,  $b_p$  为抽运光线性啁啾因子。将(4)式代入(3)式,针对啁啾匹配方案,信号瞬时频率可表达为

$$\omega_s(t) = \omega_{s0} + b_s t, \quad (5)$$

式中  $\omega_{s0}=0$  时刻的信号频率,  $b_s$  为信号线性啁啾因子。

进一步由(3),(4)及(5)式可得到啁啾匹配方案下,抽运、信号线性啁啾因子存在关系:

$$b_s/b_p = A. \quad (6)$$

由于传统的共线 OPCPA 方案的增益谱很窄(图1),对于宽带宽的超短脉冲,通常采用非共线 OPCPA 方案来进行放大。啁啾匹配方案下,由于抽运光的波长随时间变化,相应的瞬时增益谱随时间可以扫描很大的波长范围,从而有效地克服了传统的共线 OPCPA 方案的增益谱很窄的缺点,在共线的情况下,对满足啁啾匹配条件的信号光实现了宽带放大。

啁啾匹配方案下,由于不同时刻抽运光的频率不同,导致不同时刻的光参变放大过程的瞬时增益谱不同。若使得抽运光、信号光的线性啁啾因子满足(6)式,则瞬时增益谱的中心频率随时间变化速率与啁啾信号脉冲瞬时频率随时间变化速率(即啁啾大小)一致,从而可使得信号得以高倍放大,而噪声

则由于其瞬时频率是随机的或部分啁啾的,其瞬时频率不满足(5)式,加之每一时刻的瞬时增益谱(图1)又比较窄,最终导致噪声的能量增益很小。这样,超短脉冲激光的信噪比就得到了有效提高。

### 3 数值模拟及分析

输入抽运光和信号光的电场强度可以表示为

$$E_j(t) = E_{j0} \exp\left[-\frac{1+iC_j}{2}\left(\frac{t}{T_j}\right)^2\right], \quad (7)$$

式中  $E_{j0}, C_j, T_j$  ( $j=s, p$ ) 分别表示信号光和抽运光的电场强度、啁啾、 $1/e$  强度的半宽度。

根据(6)式和(7)式可以得到抽运光啁啾和信号光啁啾之间的关系为

$$\frac{C_s}{C_p} = A \frac{T_p^2}{T_s^2}. \quad (8)$$

例如,抽运光中心波长为 532 nm,信号光啁啾为 2123,抽运信号脉宽比为 2 时,由(8)式计算可知,抽运光啁啾大小应为 3739。

信噪比通常有两种定义:即信号光与噪声能量之比<sup>[10]</sup>、信号光与噪声强度之比<sup>[11]</sup>。本文将信噪比定义为信号光与噪声能量之比:

$$f_{\text{SNR}} = \frac{W_s}{W_n}, \quad (9)$$

式中  $W_s$  和  $W_n$  分别为信号和噪声的能量。

通过数值模拟来讨论非线性晶体长度、抽运光信号光啁啾匹配程度、噪声带宽大小、抽运光和信号光同步程度等因素对信噪比的提升以及转换效率的影响。在本节计算中,不加以特别提及时,对于啁啾匹配 OPCPA 方案,抽运光、信号光时间上均为线性啁啾高斯脉冲,其初始强度分别为  $1 \text{ GW/cm}^2$  和  $0.35 \text{ MW/cm}^2$ ,其强度半峰全宽分别为 200 ps 和 100 ps,其中心波长分别为 532 nm 和 800 nm,其初始谱宽分别为 20 nm 和 7.8 nm,其啁啾参数分别为 3739,2123;BBO 晶体的长度为 1 cm,非共线角  $\alpha=0^\circ$ ;噪声谱呈高斯分布,噪声的带宽为 180 nm,峰值波长为 790 nm,噪声初始平均强度为  $0.35 \text{ kW/cm}^2$ 。对于非共线 OPCPA 方案,非共线角  $\alpha=2.38^\circ$ ,抽运光啁啾为 0,其他参数同啁啾匹配 OPCPA 方案。

图3(a)给出了信号与噪声的能量增益及信噪比提升倍数随晶体长度的变化。随着晶体长度的增加,信号光的能量增益先增大后减小,而噪声的能量增益则一直增大。这是因为信号在增大到一定程度后将趋于饱和甚至回流至抽运光;而噪声因其强度远小于信号强度,在晶体不是很长时,它总处于小信

号增益状态,其能量总能得到放大。图 3(b)给出了信噪比提升倍数及转换效率随晶体长度的变化。随着晶体长度的增加,信噪比提升倍数及转换效率均先增大后减小,其原因与图 3(a)的相同,均是由增益饱和和效应造成的。进一步由图 3(b)还可以看出,啁啾匹配方案和非共线方案下的转换效率几乎一致,但前者的信噪比提升倍数比后者的大得多(前者的信噪比提升倍数峰值是后者的 20 倍)。这是因为非共线方案下的增益带宽非常宽(图 1),以至于大部分的噪声均可以得到有效放大,从而导致信噪比

提升不明显。而对于啁啾匹配方案,就抽运光脉冲的某一时刻而言,其相应的瞬时增益谱取决于该时刻的抽运光波长<sup>[9]</sup>。因此,对于啁啾匹配方案而言,只有落在瞬时增益谱以内的小部分噪声能得到放大,而信号由于时刻满足相位匹配关系,总能得到有效放大,从而信噪比能得到明显提升。此外,图 3(b)还表明,对于啁啾匹配方案,存在一合适的晶体长度,使得在获得较大信噪比提升倍数的同时还能保证较高的转换效率。

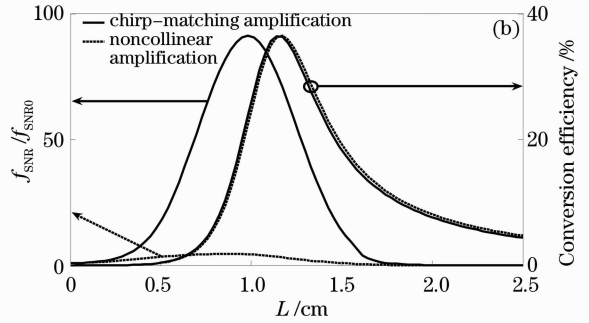
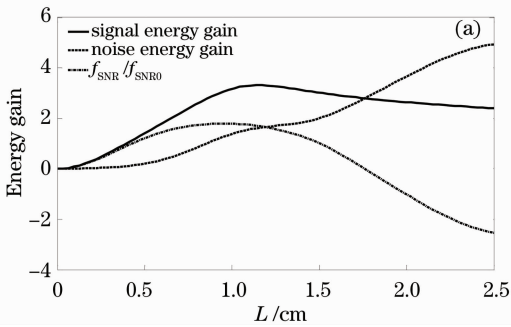


图 3 (a) 信噪比提升倍数、信号与噪声的能量增益随晶体长度的变化, (b) 信噪比提升倍数及转换效率随晶体长度的变化  
Fig. 3 (a) Variation of energy gain and signal-to-noise ratio promotion ( $f_{\text{SNR}}/f_{\text{SNR0}}$ ) with the crystal length  $L$  for linear-chirp-compensation scheme, (b) variation of signal-to-noise ratio promotion and conversion efficiency with the crystal length

图 4 给出了信噪比提升倍数及转换效率随抽运啁啾的变化。由图 4 可知,对于一给定的信号啁啾(例如  $C_s = 2123$ ),随着抽运光啁啾的增加,信噪比提升及转换效率均先增大后减小,并在  $C_p = 3750$  处获得最大值,这与(8)式的计算结果较一致。因此,对于啁啾匹配方案,存在最佳的抽运啁啾,使得信噪比提升倍数及转换效率同时获得最大值,且最佳的抽运啁啾可以由(8)式计算得到。

出,对于啁啾匹配放大方案,噪声带宽越宽,信噪比提升越明显;而对于非共线放大方案,信噪比提升倍数随噪声带宽变化不明显。这是因为啁啾匹配放大方案中每一时刻的参量增益带宽较窄且由该时刻的抽运光波长决定,而当抽运光啁啾一定时,噪声带宽越宽,每一时刻被放大的几率越小,噪声的能量增益也越小,因而放大后信噪比越高。而对于非共线放大方案,由于其增益带宽非常宽(图 1),噪声几乎总能得到有效放大,使得信噪比提升倍数随噪声带宽变化不明显。

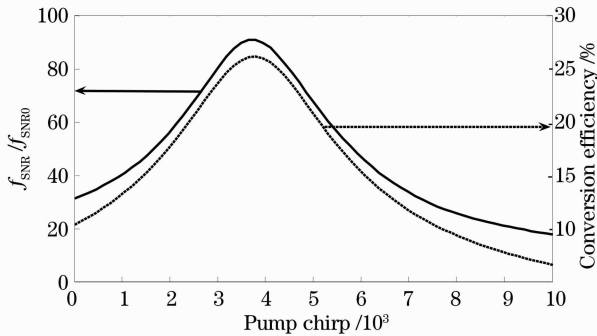


图 4 信噪比提升倍数及转换效率随抽运光啁啾的变化  
Fig. 4 Variation of signal-to-noise ratio promotion and conversion efficiency with the pump chirp

为了说明噪声带宽对信噪比提升效果的影响,图 5 给出了啁啾匹配与非共线放大两种方案下,信噪比提升倍数随噪声带宽的变化。从图 5 可以看

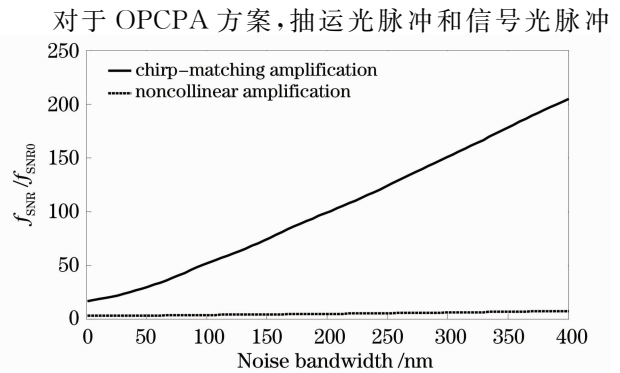


图 5 信噪比提升倍数随噪声带宽的变化  
Fig. 5 Signal-to-noise ratio promotion after linear-chirp-compensation scheme versus different noise bandwidth



很难实现完全意义上的同步,两者之间总会存在一定的延迟。

图 6 给出了啁啾匹配方案下,信噪比提升倍数及转换效率随抽运信号之间时间延迟的变化。随着时间延迟的增加,信噪比提升倍数及转换效率均迅速减小。这是因为当抽运光和信号光不同步时,光参变放大的时间窗口变窄,且抽运信号之间的啁啾匹配关系遭到破坏,进而导致转换效率及信号光的能量增益随着时间延迟增大而减小,而噪声的能量增益则几乎不受影响,从而使得信噪比提升倍数也会减小。由此可见,对于啁啾匹配方案,抽运光和信号光同步精度对输出稳定性有很大的影响,有效地控制抽运光脉冲和信号光脉冲的同步具有重要的意义。

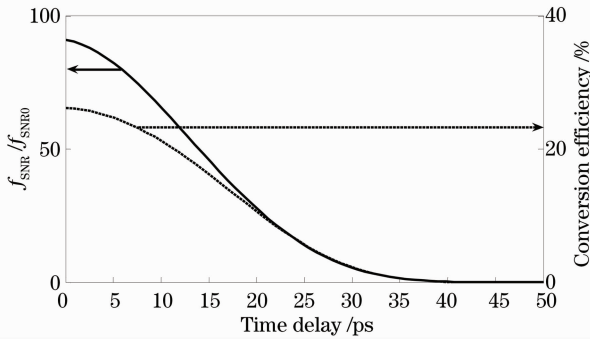


图 6 信噪比提升倍数及转换效率随抽运信号之间时间延迟的变化

Fig. 6 Variation of signal-to-noise ratio promotion and conversion efficiency with the delay of pump and signal pulses

若抽运光脉冲和信号光脉冲时间上均为平顶脉冲,且两者的波长较接近,则采用啁啾匹配方案,可以在提高信噪比的同时,还能获得更高的转换效率。图 7 给出了啁啾匹配方案下,信噪比提升倍数及转换效率随晶体长度的变化,相应的计算参数为:抽运

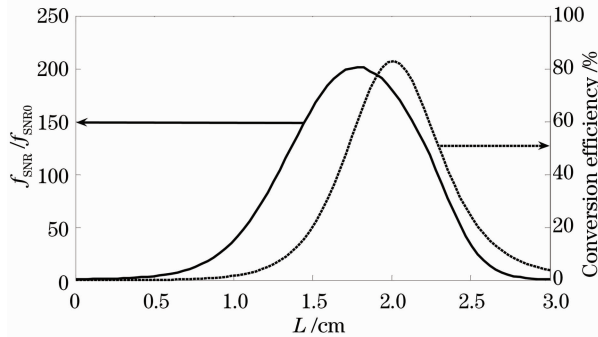


图 7 信噪比提升倍数及转换效率随晶体长度的变化

Fig. 7 Variation of signal-to-noise ratio promotion and conversion efficiency with the crystal length

光脉冲和信号光脉冲时间上均为平顶脉冲,且其脉宽均为 200 ps,相应的中心波长分别为 700 nm 和 800 nm;噪声的带宽为 20 nm,其峰值波长为 800 nm,其它参数同图 3。由图 7 可知,采用啁啾匹配方案,在晶体长度约为 2 cm 时,信噪比提升约为 180 倍,与此同时,转换效率可达 83%,接近理论上的量子转换效率 87.5%。与图 3(b)相比,在信噪比提升更大的同时,转换效率也得到了很大的改善。

## 4 结 论

提出了一种通过啁啾匹配光参变啁啾脉冲放大来提高超短脉冲激光信噪比的方法。通过与传统的光参变啁啾脉冲放大方案比较,发现啁啾匹配光参变啁啾脉冲放大可更有效地实现信噪比的提升,同时还能保持较高的转换效率。数值模拟结果表明,非线性晶体长度、噪声带宽、抽运啁啾大小以及抽运光和信号光同步程度等因素对信噪比提升倍数和转换效率均存在明显影响。因此,采用啁啾匹配光参变啁啾脉冲放大方案来提高超短脉冲激光信噪比时,必须充分重视参数优化以及抽运光和信号光的同步等问题,以获得最佳的信噪比提升效果。此外,若抽运光脉冲和信号光脉冲时间上均为平顶脉冲,且两者的波长较接近,则采用啁啾匹配方案,可以在有效提升信噪比的同时,还能获得接近量子转换效率的高转换效率。最后值得指出的是,虽然主要是以 532 nm 抽运光、800 nm 信号光这种常见的抽运光和信号光组合为例来说明啁啾匹配 OPCPA 提升超短脉冲激光信噪比这种新的方法,但是对于其他的抽运光和信号光波长组合,该方法也是适用的。

## 参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. A. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 S. W. Bahk, P. Rousseau, T. A. Planchon *et al.*. Generation and characterization of the highest laser intensities ( $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>) [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(24): 2837~2839
- 3 H. Yoshida, E. Ishii, R. Kodama *et al.*. High-power and high-contrast optical parametric chirped pulse amplification in beta-BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 257~259
- 4 K. H. Hong, B. Hou, J. A. Nees *et al.*. Generation and measurement of  $>10^8$  intensity contrast ratio in a relativistic kHz chirped-pulse amplified laser[J]. *Appl. Phys. B: Lasers*, 2005, **81**(4): 447~457
- 5 J. Tawney, M. Richardson, R. Adhav. Electro-optic deflector isolator for short laser pulse contrast enhancement[C]. *Lasers and Electro-Optics*, 2001, CLEO'01: 97~98
- 6 A. Jullien, N. Minkovski, S. M. Saltiel.  $10^{-10}$  temporal contrast for femtosecond ultraintense lasers by cross polarized wave generation[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(8): 920~922
- 7 A. Dubietis, R. Butkus, A. P. Piskarskas. Trends in chirped

- pulse optical parametric amplification[J]. *IEEE J. QE.*, 2006, **12**(2): 163~172
- 8 I. N. Ross, P. Matousek, G. H. C. New *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(12): 2945~2956
- 9 Y. Tang, I. N. Ross, C. Hernandez-Gomez *et al.*. Optical parametric chirped-pulse amplification source suitable for seeding high-energy systems[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(20): 2386~2388
- 10 J. Moses, C. Manzoni, S. Huang *et al.*. Temporal optimization of ultrabroadband high-energy OPCPA[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5540~5555
- 11 I. N. Ross, G. H. C. New, P. K. Bates. Contrast limitation due to pump noise in an optical parametric chirped pulse amplification system [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(2): 510~514