

不同含氘量DKDP晶体参量匹配与 放大啁啾脉冲压缩特性分析

孙美智 康俊 张艳丽 谢兴龙 朱健强 林尊琪

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 针对在808 nm波段的光参量放大系统(OPA),详细分析了氘化磷酸二氢钾(DKDP)晶体非共线相位匹配的非线性过程。通过数值计算,给出了不同氘化率的DKDP晶体参量匹配特性以及匹配参数;在此基础上,利用OPA耦合波方程组分析了基于氘化率为95%的DKDP晶体的光参量啁啾脉冲放大器(OPCPA)的输出特性。结果显示,对大于30 fs压缩脉宽的超短脉冲激光系统,氘化率为90%以上的DKDP晶体具有足够的增益带宽与能量提取效率,但接收角较小,增加了工程调节难度。

关键词 非线性光学;光参量啁啾脉冲放大;非共线相位匹配;超宽带;氘化磷酸二氢钾

中图分类号 O437.3;TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1219002

Analysis on Phase Matching and Compression of Amplified Chirped Pulse for Various Deuteration Level DKDP Crystals

Sun Meizhi Kang Jun Zhang Yanli Xie Xinglong Zhu Jianqiang Lin Zunqi

Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The non-collinear phase-matching of 808 nm centered optical parametric amplification(OPA) is analyzed in detail in potassium dideuterium phosphate (DKDP) crystal. Phase-matching parameters for various deuteration DKDP crystals are calculated based on the concepts. Optical parametric chirped pulse amplifier(OPCPA) based on 95% deuteration DKDP crystal is designed and the output characteristics are simulated by OPA coupled wave equations for further discuss. It is concluded that DKDP crystals higher than 90% deuteration level can be utilized in ultra-short high power laser systems with compressed pulses broader than 30 fs. The disadvantage is that the acceptance angles are small, increasing the difficulty of engineering regulation.

Key words nonlinear optics; optical parametric chirped pulse amplification; noncollinear phase matching; ultrabroadband; potassium dideuterium phosphate

OCIS codes 190.4410; 190.4970; 140.4480.

1 引 言

超短超强脉冲固体激光技术正在国内外蓬勃发展,这得益于3个主要原因:1)优质增益介质发明及其制造加工工艺逐步完善,包括大口径光学非线性晶体、钛宝石等^[1-4];2)先进激光放大技术被提出且其应用日趋成熟,如光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术以及再生放大技术^[5-11];3)为进行激光惯性约束核聚变(ICF)研究建造的大批高能纳秒脉冲激光装置以及以此为需求发展起来的先进工程工艺技术,为超短脉冲激光放大提供了优质的抽运光源与可靠的大口径光学元器件^[11,12-13]。目前,国内外在已建成的百太瓦(TW)到拍瓦(PW)高功率飞秒激光器基础上,已开始着手建造功率高达亚艾瓦(EW)量级的超高功率飞秒激光器,以欧洲十三

收稿日期:2015-04-22;收到修改稿日期:2015-05-30

基金项目:国家自然科学基金(11304332, 61205210)

作者简介:孙美智(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事超短脉冲放大技术与先进相位检测技术方面的研究。

E-mail: eric913@siom.ac.cn

国计划联合建造的 Extreme light infrastructure(ELI)与俄罗斯计划建造的 Exawatt Center for Extreme Light Studies(XCELS)为代表^[14-15]。两大装置峰值功率设计指标均为 200 PW,而正在实施中的是设计指标在 10 PW 量级的单光束原型机,其最终目标是通过多路光组束技术实现亚艾瓦甚至更高功率的短脉冲输出^[16-17]。此外,英国卢瑟福实验室以原有 Vulcan 装置为基础,正在建造 10 PW 量级激光装置,法国也正在建造相同功率量级的 APPLON 系统^[18-19]。由于 OPCPA 技术结合了啁啾脉冲放大技术(CPA)和光参量放大技术(OPA),具有大增益带宽、低 B 积分、高信噪比、小热沉积、高光束质量等优点,因此在技术途径上,上述装置前端设计全部采用 OPCPA 技术,除 ELI 外其他系统均采用全 OPCPA^[14-21]。

尽管非线性晶体生长技术取得了很大进步,但建造单束 10 PW 级参量放大系统非线性晶体方面仍面临两个主要问题。其一,根据傅里叶变换关系,越短的压缩脉宽意味着更宽的频谱,以实现数 20 fs 的超短脉冲输出为例,在 808 nm 附近要求整个放大系统的增益半高全宽超过 50 nm。其二,要实现压缩超短脉冲能量输出数百焦耳,考虑到压缩器的大量损耗以及非线性晶体与表面膜层的破坏阈值限制,要求该类装置末级光束口径需达到 200 mm 甚至更大,因此获取高破坏阈值的大口径非线性晶体材料是另一难点。同时具备工作波段、增益带宽、口径与破坏阈值 4 个条件的晶体,当前已经报道出来的包括三硼酸锂(LBO)与三硼酸氧钙钇(YCOB),已实现应用的最大通光口径分别是 80 mm 与 63 mm^[3,22],更大口径的晶体正在生长之中,但不可否认的是短期内实现口径 200 mm 量级依然存在巨大困难。氟化磷酸二氢钾(DKDP)是当前唯一能够快速生长的大口径非线性晶体,且其破坏阈值较高,在不同的氟化率条件下具有不同的匹配特性,因此在 910 nm 波段被英国与俄罗斯的装置采用。但在 808 nm 波段不同氟化率晶体的应用潜力怎样,能够支持的最窄压缩脉冲脉宽多大,这些问题依旧需要详细研究和分析。

由于考虑到兼顾钛宝石放大技术与参量放大技术的应用,国内目前正在建造中的超短脉冲系统选择了 808 nm 波段。本文针对 808 nm 波段参量放大过程,通过数值模拟,分析了 DKDP 晶体内一类(o+o=e)非共线匹配方式,研究不同氟化率的 DKDP 晶体参量匹配特性,给出了最佳非共线角、相位匹配角、走离角、接收角、有效非线性系数、增益带宽等匹配参数;在此基础上,提出基于 DKDP 晶体的参量放大器设计,并利用时域参量放大耦合波方程组分析了参量放大器的输出特性与啁啾脉冲压缩特性。研究内容对于 DKDP 晶体光参量放大器设计具有实际参考意义。

2 DKDP 晶体非共线相位匹配参量特性

2.1 晶体色散方程与损耗

非线性晶体色散方程是参量放大过程相位匹配参数计算的基础,而 DKDP 晶体的色散方程与氟化率相关,DKDP 晶体的色散方程为^[21]

$$n_{o,e}^2(D,\lambda) = \left[\frac{n_{o,e}^2(0.96,\lambda) - 0.04n_{o,e}^2(0,\lambda)}{0.96} \right] D + (1-D)n_{o,e}^2(0,\lambda), \quad (1)$$

式中 $n_{o,e}(D,\lambda)$ 表示氟化率为 D 的 DKDP 晶体在波长 λ 处的主轴折射率,氟化率为 96% 的晶体折射率 $n_{o,e}^2(0.96,\lambda)$ 与氟化率为 0 的 KDP 晶体折射率 $n_{o,e}^2(0,\lambda)$ 分别为

$$\begin{aligned} n_o^2(0.96,\lambda) &= 2.240921 + \frac{2.246956\lambda^2}{\lambda^2 - 11.26591^2} + \frac{0.009676}{\lambda^2 - 0.124981^2}, \\ n_e^2(0.96,\lambda) &= 2.126019 + \frac{0.784404\lambda^2}{\lambda^2 - 11.10871^2} + \frac{0.008578}{\lambda^2 - 0.109505^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} n_o^2(0,\lambda) &= 2.259276 + \frac{13.00522\lambda^2}{\lambda^2 - 400} + \frac{0.01008956}{\lambda^2 - (77.26408)^{-1}}, \\ n_e^2(0,\lambda) &= 2.132668 + \frac{3.2279924\lambda^2}{\lambda^2 - 400} + \frac{0.008637494}{\lambda^2 - (81.42631)^{-1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

相对于偏硼酸钡(BBO)、LBO、YCOB 晶体,DKDP 晶体在红外波段体损耗要高出许多,而且损耗系数与氟化率相关。不同氟化率晶体的透射率曲线可以通过实验测量获得,图 1 给出了 50 mm 长度且氟化率分别为 0、0.7 与 0.95 的 DKDP 晶体透射率曲线,这是笔者目前查询到的最为详细的测量数据^[23]。DKDP 晶体在 1200~

1800 nm 波段的高损耗,将导致参量放大过程中闲频光的损耗。

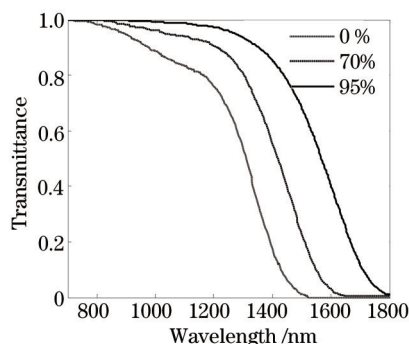


图1 不同氘化率DKDP晶体透射率曲线

Fig.1 Internal transmittance of DKDP for different deuteration levels

2.2 非共线匹配特性

非共线参量放大过程中三波矢量关系如图2(a)所示,其中 k_s 、 k_i 、 k_p 分别表示信号光、闲频光和抽运光波矢, Z 轴表示光轴, θ 表示抽运光波矢与光轴夹角, α 表示信号光与抽运光的夹角(即非共线角), β 表示闲频光与抽运光的夹角。负单轴晶体中的走离角如图2(b)所示, s_o 与 s_e 分别表示寻常光(o光)与非寻常光(e光)能流方向, k_o 与 k_e 分别表示寻常光与非寻常光的波矢, ρ 表示非寻常光波矢与能流的走离角。

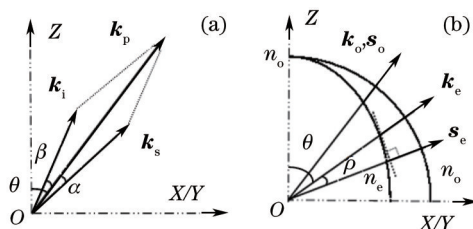


图2 非共线OPA过程(a)波矢量关系以及(b)负单轴晶体中的走离角

Fig.2 Noncollinear OPA (a) vectors and (b) walkoff angle in negative uniaxial crystals

根据参量过程中三波满足动量守恒和能量守恒,可得第一类匹配方式 $o+o=e$ 相位匹配角的表达式为

$$\theta_{pm} = \arcsin \left\{ \left[\frac{n_p^{\circ 2} / \lambda_p^2 - (n_s^{\circ} / \lambda_s \cos \alpha + n_i^{\circ} / \lambda_i \cos \beta)^2}{n_p^{\circ 2} - n_p^{e 2}} \right]^{1/2} \frac{n_p^e}{n_s^{\circ} / \lambda_s \cos \alpha + n_i^{\circ} / \lambda_i \cos \beta} \right\}, \quad (4)$$

相位失配因子表达式为

$$\Delta k = \Delta k_{//} = 2\pi n_p / \lambda_p - 2\pi n_s \cos \alpha / \lambda_s - 2\pi n_i \cos \beta / \lambda_i, \quad (5)$$

式中下标 s, i 与 p 分别表示信号光、闲频光与抽运光, n° 与 n^e 分别表示 o 光与 e 光的轴向折射率, n_s, n_i 与 n_p 表示三波在 (θ, φ) 方向上的折射率, 夹角 $\beta = \arcsin[(n_s/n_i) \cdot (\lambda_i/\lambda_s) \cdot \sin \alpha]$ 。

参量放大过程相位匹配技术的诸多参数概念可以参考文献[24], 根据(4)、(5)式并采用相同的数值分析方法, 可以得到不同氘化率 DKDP 晶体内, 中心波长 808 nm 信号光, 526.5 nm 抽运光光参量放大过程中的匹配参数。取同一长度为 30 mm 的 DKDP 晶体, 对应于 30%、70%、85%、90%、93% 以及 95% 6 种氘化率情况下, 图 3 给出了相应的参量带宽随非共线夹角的变化曲线。

从图 3 中各条曲线可以看出, 总是存在一个最佳非共线夹角 (α_{opt}) 使得参量带宽取得最大值 ($\Delta \lambda_p$)。6 种氘化率的 DKDP 晶体对应的非共线夹角与参量带宽分别是 $(0^\circ, 5 \text{ nm})$ 、 $(0^\circ, 13 \text{ nm})$ 、 $(0^\circ, 37 \text{ nm})$ 、 $(0.13^\circ, 57 \text{ nm})$ 、 $(0.376^\circ, 58 \text{ nm})$ 与 $(0.473^\circ, 59 \text{ nm})$ 。氘化率低于 85% 的 DKDP 晶体在共线匹配中获得的最大参量带宽小于 40 nm, 考虑到一定冗余度, 不适合应用于 808 nm 波段当前发展中的低于 50 fs 输出的超短超强激光系统; 从图 1 可以看出低氘化率的 DKDP 晶体在闲频光波段(约为 1510 nm)的损耗要远远大于高氘化率晶体, 这更加不利于信号光波段有效放大, 所以下文仅考虑氘化率高于 90% 的 DKDP 晶体。图 4 给出了 3 种氘化率以及相应最佳非共线夹角条件下的匹配曲线, 相位匹配角分别是 $36.89^\circ, 36.80^\circ, 36.73^\circ$ 。

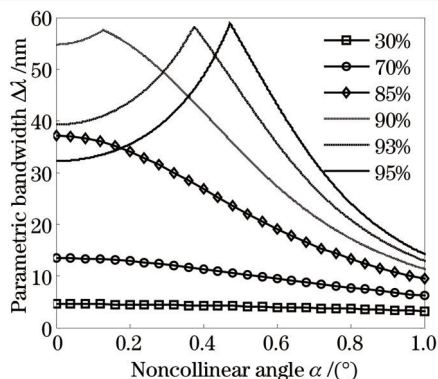


图3 不同氘化率的30 mm长度DKDP晶体中参量带宽随非共线夹角的变化

Fig.3 Parametric bandwidth versus noncollinear angle in 30 mm DKDP crystals of various deuteration levels

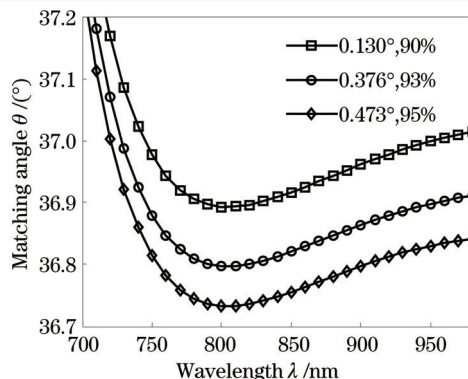


图4 不同氘化率的DKDP晶体中最佳非共线夹角对应的匹配曲线

Fig.4 Phase-matching curves for the optimal noncollinear angles in DKDP crystals of various deuteration levels

图5(a)给出了3种氘化率的DKDP晶体中接收角随非共线夹角的变化曲线,对应于3个最佳非共线夹角,长度30 mm晶体的接收角约0.46 mrad;根据文献[24]的计算方法,可以得到在同一波段的可用晶体BBO、LBO与YCOB的接收角与对应长度分别是(0.37 mrad, 15 mm)、(1.95 mrad, 20 mm)、(0.78 mrad, 20 mm),DKDP晶体较小的接收角是其工程应用中的缺点。走离角是光束在晶体的传输过程中波矢与玻印亭矢量的夹角。负单轴晶体中,只有非寻常光的走离角不为零。图5(b)曲线表示抽运光在3种氘化率晶体中的走离角变化,在最佳非共线夹角处3个走离角约-25.4 mrad;作为对比,BBO、LBO与YCOB的接收角分别是-57.81、8.40、-19.79 mrad,上述数据处于同一量级。走离长度是指光束传输中,一定口径的o光与e光在空间上完全分离的距离,走离效应导致的放大效率的降低程度与走离长度有关。走离长度表达式为 $L_w = a / \tan \rho$,式中 a 表示光束口径,对于口径为150 mm量级的大口径光束参量放大系统中,DKDP晶体走离长度约为6 m,对于能够获得更大口径的DKDP晶体而言,该数值远远大于几十毫米的实际晶体工作长度,所以走离效应的影响可以忽略。

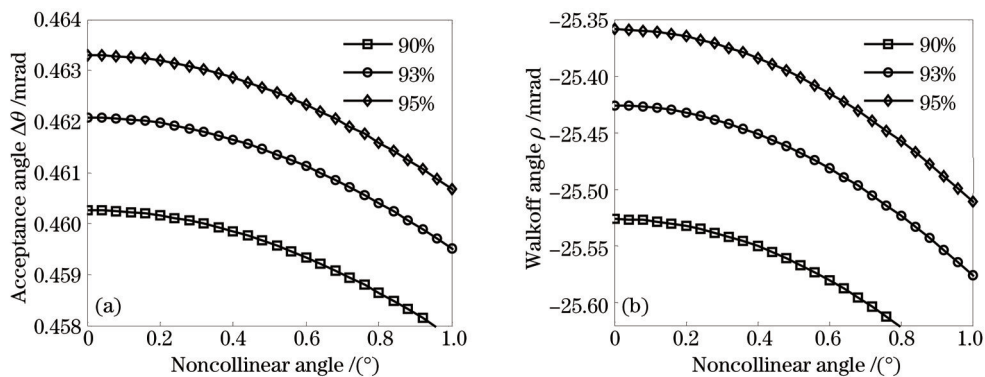


图5 长度30 mm不同氘化率的DKDP(a)接收角和(b)走离角随非共线夹角的变化曲线

Fig.5 (a)Acceptance angle and (b) walkoff angle versus noncollinear angles in 30 mm DKDP crystal of various deuteration levels

氘化率96%的DKDP晶体的非线性系数 $d_{36}(1.064 \mu\text{m})=0.37 \text{ pm/V}^{[25]}$,那么根据有效非线性系数表达式 $d_{\text{eff}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$,方位角 ϕ 取值 45° ,计算得到 $d_{\text{eff}}=0.2213 \text{ pm/V}$ 。通过相位匹配技术的讨论可以得到结论:氘化率要超过90%的DKDP晶体参量带宽接近60 nm,该带宽数值在 Gaussian 波形下对应的傅里叶变换限是16 fs,但其接收角较小,增加了工程应用的难度;90%、93%与95%氘化率的DKDP晶体匹配参数总结如表1所示。

表1 不同氘化率DKDP晶体非共线参量放大过程匹配参数

Table 1 Phase matching parameters in DKDP crystals for different deuteration levels

Deuteration level	L / mm	$\alpha_{\text{opt}} / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	$\Delta\theta / \text{mrad}$	ρ / mrad	$d_{\text{eff}} / (\text{pm/V})$	$\Delta\lambda_p / \text{nm}$
90%	30	0.130	36.89	0.4602	-25.52	0.2221	57
93%	30	0.376	36.80	0.4617	-25.43	0.2216	58
95%	30	0.473	36.73	0.4628	-25.40	0.2213	59

3 时域耦合波方程组模拟

3.1 耦合波方程组与啁啾脉冲压缩

为讨论损耗与群速失配对非线性过程的影响,从而分析末级主放大系统输出波形、转换效率以及可压缩特性,需要依据 OPA 耦合波方程组进行数值模拟。以钕玻璃激光器基频光经倍频获得 526.5 nm 波长的时空超高斯型脉冲作为抽运源,以中心波长 808 nm 的时空超高斯型啁啾脉冲作为信号光,方形光束的两种时空超高斯型脉冲的复振幅可以统一描述为

$$\tilde{A}_{(x,y,T)} = A \exp\left(-\frac{x^n}{2x_0^n}\right) \exp\left(-\frac{y^n}{2y_0^n}\right) \exp\left(-\frac{T^m}{2T_0^m}\right) \exp\left[-i\left(\frac{CT^2}{2T_0^2} + \omega_0 T\right)\right], \quad (6)$$

式中 m 与 n 分别表示时域和空域超高斯阶数, ω_0 表示脉冲中心圆频率,对应的中心波长表示为 λ_0 , C 代表脉冲的啁啾特性参数, T_0 、 x_0 与 y_0 在数学上分别表示光强最大值的 e^{-1} 处所对应的时域和空域边界的横坐标数值,取 $x_0=y_0=r_0$;但在应用中光束口径与脉冲宽度普遍采用光强最大值 1/2 处,即半峰全宽(FWHM, R_0 与 τ_0),且有转换关系 $R_0=2(\ln 2)^{1/m}r_0$ 与 $\tau_0=2(\ln 2)^{1/m}T_0$ 。采用 FWHM 标准,输入方形信号光与抽运光的光束口径分别是 150 mm 与 145 mm,脉宽 2 ns 与 2.2 ns,信号光与抽运光能量分别为 20 J 与 1000 J,该能量对应于抽运光功率密度为 2 GW/cm²。信号光的啁啾率选择为 $C_i=1.040\times 10^5$,也可以将啁啾率描述成为 2 ns/60 nm,两者在物理本质上相同。上述参数总结如表 2 所示。

表 2 输入信号光与抽运光脉冲参数

Table 2 Laser parameters of incident signals and pumping pulses

	λ_0 /nm	E /J	n	m	τ_0 /ns	R_0 /mm	C
Signal	808	20	4 th	4 th	2	150	1.040×10^5
Pump	526.5	1000	6 th	4 th	2.2	145	0

为更加详细的反映 OPA 输出脉冲光谱及其可压缩极限,依据抽样定理需要对纳秒级啁啾脉冲进行到步长小于数飞秒级的离散化,如此生成大量的数据,因此下面的模拟限于时域,耦合波方程组为^[26]

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{s(z,T)}}{\partial z} &= \frac{i\omega_s d_{\text{eff}}}{n_s c} A_{i(z,T)}^* A_{p(z,T)} \exp(-i\Delta kz) - \left(\frac{1}{V_{gs} \cos \rho_s} - \frac{1}{V_{gp}}\right) \frac{\partial A_{s(z,T)}}{\partial T} - \alpha_s A_{s(z,T)}, \\ \frac{\partial A_{i(z,T)}}{\partial z} &= \frac{i\omega_i d_{\text{eff}}}{n_i c} A_{s(z,T)}^* A_{p(z,T)} \exp(-i\Delta kz) - \left(\frac{1}{V_{gi} \cos \rho_i} - \frac{1}{V_{gp}}\right) \frac{\partial A_{i(z,T)}}{\partial T} - \alpha_i A_{i(z,T)}, \\ \frac{\partial A_{p(z,T)}}{\partial z} &= \frac{i\omega_p d_{\text{eff}}}{n_p c} A_{s(z,T)} A_{i(z,T)} \exp(i\Delta kz) - \alpha_p A_{p(z,T)}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中等号左侧表示晶体内耦合与传输的三波振幅变化,等号右侧第一项表示非线性增益,因为(6)式中采用 $\exp(-i\omega_0 T)$ 作为单色波相位的定义规则,所以(7)式中非线性增益项没有文献[26]中方程组的负号,第二项表示群速失配,其中 V_{gs} 、 V_{gi} 与 V_{gp} 分别表示信号光、闲频光与抽运光的群速度,且有 $V_g = (\partial k / \partial \omega)^{-1}|_{\omega_0}$,第三项表示晶体内损耗, α_s 、 α_i 和 α_p 为损耗系数,由图 1 透射率曲线可以看出损耗系数与波长相关,并通过下式求解:

$$\alpha(\lambda) = -[\ln T(\lambda)] / 2L_0, \quad (8)$$

式中 T 表示透射率, L_0 表示测量晶体长度,该处长度 $L_0=50$ mm。方程组的求解采用差分法与四阶龙格库塔法^[27-28]。假设压缩器提供二阶色散量 $\phi(\omega)$,那么对于输入为 $A(T)$ 的啁啾脉冲,压缩器输出脉冲 $B(T)$ 可由下式得到^[29-30]:

$$B(T) = \mathcal{F}^{-1}\{\exp[i\phi(\omega)] \cdot \mathcal{F}[A(T)]\}. \quad (9)$$

3.2 啁啾脉冲放大与压缩

根据表 2 给定的参数,将损耗因子考虑在内,通过耦合波方程组数值模拟可以得到参量放大器的信号光脉冲归一化输入输出波形,如图 6 中实线所示。可以看出,输出信号光脉冲脉宽要略小于输入脉冲脉宽,其 FWHM 标准数值约为 1.76 ns,在参量放大过程中由于色散效应导致的信号光啁啾特性变化很小,这个脉宽代表的光谱宽度约 52 nm,该数据同样仅略小于参量带宽(35 mm 长度晶体参量带宽为 54.5 nm)。转换效率被

定义为信号光输出能量与三波输入总能量之比,那么转换效率如图7中实线所示,信号光效率达到49%,这说明抽运光能量得到了很好的提取。图8中的实线曲线给出了压缩器的输出脉冲波形,可以看出压缩脉冲的脉宽约为30 fs,而不经参量放大直接进行压缩得到的脉冲脉宽是24 fs,因放大过程光谱变化导致的脉宽增加比率为25%。

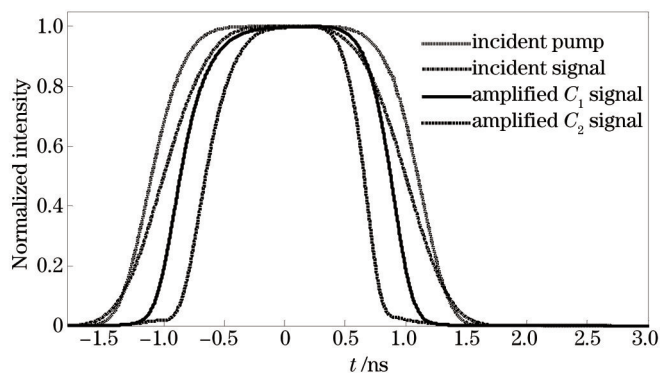


图6 参量放大器输入输出脉冲归一化波形

Fig.6 Normalized intensity of incident pulses and output pulses in OPA

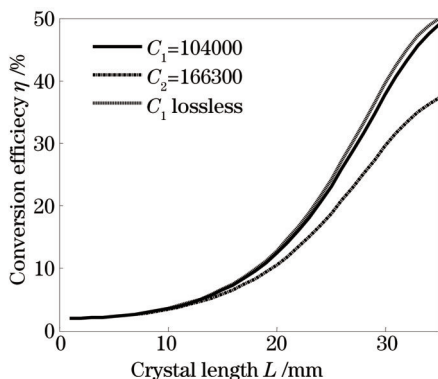


图7 能量转换效率随晶体长度的变化

Fig.7 Conversion efficiency versus crystal length

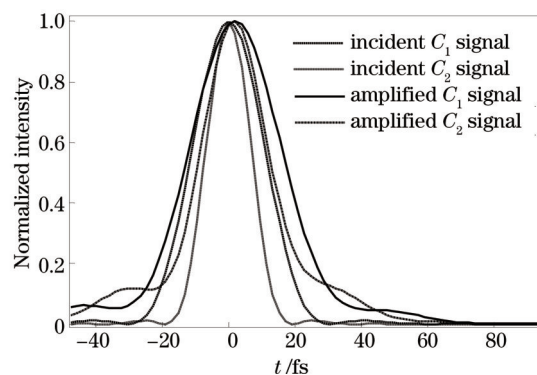


图8 不同啾啾率的输入及放大啾啾脉冲的压缩波形

Fig.8 Waveform of compressed pulses for the incident and amplified chirped pulses of various chirped ratios

作为对比,在其他参数不变的情况下改变信号光啾啾率 $C_2=1.663 \times 10^5$,经过相同的模拟过程得到参量放大器输出波形如图6中虚实线曲线所示。在 C_2 啾啾率下,输入信号光光谱96 nm,远大于参量放大器的匹配带宽,其输出脉宽1.3 ns,远小于输入信号光脉宽,但谱宽达到62 nm。时域两端未能形成有效匹配,抽运光能量只有部分被有效提取,因此图7中点划线所表示的转换效率只能达到约37%,远低于啾啾率为 C_1 的情况。压缩输出的信号光脉冲波形如图8点划线曲线所示,压缩脉冲脉宽约为24 fs,而未经放大的压缩脉冲脉宽为15 fs,放大过程导致脉宽增加了60%。这说明即便增大入射信号光的光谱宽度,最终的压缩脉冲脉宽总会大于20 fs。

为了明确闲频光的损耗对参量放大过程的影响程度,图7中虚线给出了不计入损耗且啾啾率为 C_1 的脉冲转换效率。在相同的晶体长度上,损耗因子会使得转换效率降低,但其差别仅有1%,这说明损耗并没有给参量放大过程造成明显影响。

4 结 论

研究了808 nm波段以DKDP晶体作为增益介质的参量放大器设计边界。以526.5 nm窄带脉冲作为抽运光,通过数值计算了不同氧化率的DKDP晶体相位匹配特性;在此基础上,利用参量放大耦合波方程组分析了参量放大器的输出特性及其压缩特性。结果显示,对于808 nm波段压缩脉冲脉宽大于30 fs的单级超短脉冲激光系统,氧化率90%以上的DKDP晶体具有足够的增益带宽与较高的能量增益,晶体在闲频光波段的损耗不会造成信号光转换效率的明显影响,DKDP晶体的缺点在于接收角较小,系统调节难度较大。

- 1 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of science[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 721–729.
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 721–729.
- 2 Makoto Iwai, Taisuke K, Hiroyuki F, *et al.*. Crystal growth and optical characterization of rare-earth (Re) calcium oxyborate $\text{ReCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (Re=Y or Gd) as new nonlinear optical material[J]. Jpn J Appl Phys, 1997, 36(3A): L276–L279.
- 3 L Xu, L Yu, X Liang, *et al.*. High-energy noncollinear optical parametric-chirped pulse amplification in LBO at 800 nm[J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4837–4840.
- 4 Alombert-Goget G, K Lebbou, N Barthalay, *et al.*. Large Ti-doped sapphire bulk crystal for high power laser applications[J]. Opt Mate, 2014, 36(12): 2004–2006.
- 5 A Dubietis, G Jonusauskas, A Piskarskas. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal[J]. Opt Commun, 1992, 88(4–6): 437–440.
- 6 I N Ross, P Matousek. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers [J]. Opt Commun, 1997, 144(1–3): 125–133.
- 7 I N Ross, P Matousek, G New, *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(12): 2945–2956.
- 8 Erhard W Gaul, Mikael Martinez, Joel Blakeney, *et al.*. Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd: glass amplifier[J]. Appl Opt, 2010, 49(9): 1676–1681.
- 9 V V Lozhkarev, G I Freidman, V N Ginzburg, *et al.*. Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals[J]. Laser Phys Lett, 2007, 4(6): 421–427.
- 10 O V Chekhlov, J L Collier, I N Ross, *et al.*. 35 J broadband femtosecond optical parametric chirped pulse amplification system [J]. Opt Lett, 2006, 31(24): 3665–3667.
- 11 Wang Yanhai, Zhang Fuling, Liu Guocai, *et al.*. Analysis and optimization of phase-matching configuration in ultrabroadband optical parametric amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802010.
王艳海, 张福领, 刘国才, 等. 超宽带光参量放大器中相位匹配结构的分析和优化[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802010.
- 12 Peng Yujie, Pan Xue, Wang Jiangfeng, *et al.*. Research of high stability high performance picosecond pump laser for optical parametric amplification[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802009.
彭宇杰, 潘雪, 王江峰, 等. 高稳定高性能皮秒光参量放大器抽运源研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802009.
- 13 S C Burkhardt, E Bliss, P Di Nicola, *et al.*. National ignition facility system alignment[J]. Appl Opt, 2011, 50(8): 1136–1157.
- 14 Mourou G, T Tajima. More intense, shorter pulses[J]. Science, 2011, 331(6013): 41–42.
- 15 Institute of Applied Physics. Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS)[R]Russian: The Institute of Applied Physics RAS, 2011.
- 16 Extreme Light Infrastructure Preparatory Phase-PP-Final Report[R]. Romania: Extreme Light Infrastructure, 2011.
- 17 The White Book of ELI Nuclear Physics[R]. Romania: The ELI-Nuclear Physics Working Groups, 2007.
- 18 C Hernandez-Gomez, J L Collier, D Canny, *et al.*. The Vulcan 10 PW OPCPA Project[R]. London: Laser Science and Development, 2006.
- 19 Cheriaux G, F Giamb Bruno, Fréneaux, *et al.*. Apollon-10P: Status and implementation[C]. Light at Extreme Intensities, 2012, 1462: 78–83.
- 20 A Lyachev, I O Musgrave, Y Tang, *et al.*. Development of a novel large bandwidth front-end system for high peak power OPCPA systems [J]. Opt Express, 2011, 19(17): 15824–15832.
- 21 V V Lozhkarev, G I Freidman, V N Ginzbury, *et al.*. Study of broadband optical parametric chirped pulse amplification in a DKDP crystal pumped by the second harmonic of a Nd: YLF laser [J]. Laser Phys, 2005, 15(9): 1319–1333.
- 22 L Yu, X Liang, J Li, *et al.*. Experimental demonstration of joule-level non-collinear optical parametric chirped-pulse amplification in yttrium calcium oxyborate [J]. Opt Lett, 2012, 37(10): 1712–1714
- 23 M Galimberti, C Hernandez-Gomez, I Musgrave, *et al.*. Influence of the deuteration level on DKDP OPCPA amplifier[R]. Central Laser Facility Annual Report, 2010.
- 24 Sun Meizhi, Bi Qunyu, Zhang Fuling, *et al.*. Study on noncollinear phase matching in YCOB crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0119001.
孙美智, 毕群玉, 张福领, 等. YCOB 晶体非共线相位匹配技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0119001.
- 25 V G Dmitriev, G G Gurzadyan, D N Nikogosyan. Handbook of Nonlinear Optical Crystals[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009:

78-83.

德米特里耶夫, 古尔扎姜, 尼科戈相. 非线性光学晶体手册[M]. 王继扬译. 北京: 高等教育出版社, 2009: 78-83.

26 Y Chen, P Yuan, L Qian, *et al.*. Numerical study on the efficient generation of 351 nm broadband pulses by frequency mixing of broadband and narrowband Nd: glass lasers[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(13): 2737-2741.

27 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2002: 35-36.

阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 35-36.

28 Wang Nannan, Sun Meizhi, Xu Tingting, *et al.*. Analysis of optical parametric chirped pulse amplification spectrum and conversion efficiency resulting from time characteristics of signal pulse based on YCOB crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502013.

王楠楠, 孙美智, 徐婷婷, 等. 基于 YCOB 晶体分析信号光脉冲时间特性对光参变啁啾脉冲放大光谱和转换效率的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502013.

29 E B Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1969, 5(9): 454-458.

30 Zhu Ping, Xie Xinglong, Jiao Zhaoyang, *et al.*. Influence of wave-front error on temporal signal-to-noise ratio in large aperture ultrashort pulse focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1032001.

朱 坪, 谢兴龙, 焦兆阳, 等. 大口径超短脉冲聚焦系统波前误差对时间信噪比的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1032001.

栏目编辑: 史 敏