

文章编号: 0253-2239(2009)11-3088-06

抽运光波前畸变对拍瓦激光器前端 OPA 光束质量的影响

王艳海^{1,2} 潘雪¹ 李学春¹ 林尊琪¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)
² 河北科技大学理学院, 河北 石家庄 050018)

摘要 数值模拟了拍瓦激光器前端非共线光参变放大(OPA)过程中存在波前畸变的抽运光对信号光光束质量的影响。结果表明,当抽运光光束波前存在严重畸变时,衍射效应和走离效应通过不同的物理机制导致了信号光光束质量的急剧下降。在导致信号光光束质量下降的过程中,走离效应在 OPA 未饱和放大时起着主导作用,当 OPA 工作在过饱和状态时,过饱和导致的信号光近场空间分布中心凹陷成为光束质量下降的主要因素。

关键词 激光器;波前畸变;光参变放大;光束质量;拍瓦激光器

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3088

The Influence of Wave-Front-Distorted Pump Pulse on the Beam Quality of OPA Front-End System of the Petawatt Laser

Wang Yanhai^{1,2} Pan Xue¹ Li Xuechun¹ Lin Zunqi¹

(¹ National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² College of Sciences, Hebei University of Sciences and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract The influence of wave-front-distorted pump pulse on the beam quality of the amplified signal pulse in the non-collinear optical parametric amplification (OPA) is numerically simulated. The results indicate that diffraction and walk-off effects degrade the signal beam quality via different physical process when the wave-front of pump laser pulse is distorted seriously. Walk-off effect is the main factor to degrade the beam quality of the signal pulse when OPA works in linear regime. The sunken-center of spatial beam shapes induced by oversaturation of OPA play the dominant role in the degradation of beam quality when OPA works in oversaturated regime.

Key words lasers; wave-front distortion; optical parametric amplification; beam quality; petawatt laser

1 引 言

光参变啁啾脉冲放大技术(OPCPA)已被广泛应用到放大超短超强激光脉冲,与传统的啁啾脉冲放大技术相比,有诸多优点,如放大介质短,宽带高增益,高稳定性,高能量转换效率,高脉冲对比度,低热沉积等,对于获得更短的脉冲宽度、更高的聚焦强度和更高的信噪比十分有利^[1,2]。已建和在建的大能量钛玻璃皮秒拍瓦激光系统,诸如大阪大学激光工程所的

拍瓦激光装置和 FIREX,美国罗彻斯特大学的 OMEGA EP 装置,法国强激光应用实验室(LULI)的 PETAL,以及中国的神光II第九路拍瓦升级装置,都在前端采用了或准备采用 OPCPA 放大取代再生放大技术。在钛宝石飞秒激光系统中也通常采用 OPCPA 作为预放大技术。因此,在上述激光系统中,利用光参变放大技术(OPA)预放大啁啾展宽激光脉冲已成为人们研究的热点,并且已有大量的理论和实

收稿日期: 2008-12-16; 收到修改稿日期: 2009-02-24

基金项目: 国家 863-416 计划资助课题。

作者简介: 王艳海(1979—),男,博士研究生,主要从事 OPCPA 稳定性和信噪比等方面的研究。

E-mail: wyh0551@gmail.com

导师简介: 林尊琪(1942—),男,研究员,中国科学院院士,主要从事激光惯性约束聚变、高功率激光驱动器和 X 光激光等方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shnc.ac.cn

验研究^[3~9]。但是,目前这些研究主要集中在稳定性、脉冲时间对比度和转换效率等方面,对于 OPCPA 的光束质量,以及抽运光波前畸变与信号光振幅耦合,抽运光-信号光畸变波前传递,导致信号光近场和远场光束质量变差等的研究尚无考虑。本文结合神光Ⅱ第九路升级拍瓦装置的 OPCPA 前端系统特征,通过数值求解 OPA 非线性耦合波方程,研究了抽运光存在波前畸变时对信号光光束质量的影响,分别考察了走离效应和衍射效应在导致 OPCPA 光束质量

下降过程中的不同作用。

2 OPA 的数值模型

为了把放大的信号光从抽运光和闲频光中分离出来,须采用非共线光参变放大,当信号光脉冲被展宽到纳秒量级时,色散效应可忽略,并忽略掉晶体自身的损耗,考虑到走离和衍射效应,经过行波坐标变换,得到非线性耦合波方程^[10, 11]:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_s}{\partial z} + \tan \rho_s \frac{\partial E_s}{\partial y} - \frac{1}{2jn_s k_s \cos \rho_s} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_s = -j \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{cn_s \cos \rho_s} E_i^* E_p \exp(-j\Delta kz) \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} + \tan \rho_i(t) \frac{\partial E_i}{\partial y} - \frac{1}{2jn_i k_i \cos \rho_i} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_i = -j \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{cn_i \cos \rho_i} E_s^* E_p \exp(-j\Delta kz), \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} + \tan \rho_p \frac{\partial E_p}{\partial y} - \frac{1}{2jn_p k_p} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_p = -j \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{cn_p} E_s E_i \exp(j\Delta kz) \end{cases} \quad (1)$$

(1)式中下标 s, i, p 分别表示信号光、闲频光和抽运光。 n 表示激光在晶体内的折射率, k 为激光在真空中的波矢量, $\rho_s, \rho_i(t)$ 分别为信号光、闲频光波矢量与抽运光波矢量的夹角, ρ_p 为抽运光在晶体内的走离角。 d_{eff} 为非线性耦合系数, Δk 表示三波相位失配。

计算(1)式的虚部可得到波前相位耦合方程^[10],衍射效应对波前影响很小,可以忽略,从而

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_s}{\partial z} + \tan \rho_s \frac{\partial \varphi_s}{\partial y} = -\frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{cn_s \cos \rho_s} \frac{A_i A_p}{A_s} \cos \theta \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} + \tan \rho_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} = -\frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{cn_i \cos \rho_i} \frac{A_s A_p}{A_i} \cos \theta \\ \frac{\partial \varphi_p}{\partial z} + \tan \rho_p \frac{\partial \varphi_p}{\partial y} = -\frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{cn_p \cos \rho_p} \frac{A_i A_s}{A_p} \cos \theta \\ \theta = \Delta kz + \varphi_p - \varphi_s - \varphi_i, \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\varphi_s, \varphi_i, \varphi_p$ 分别为信号光、闲频光和抽运光的波前相位分布。假定初始闲频光为零,只有信号光和抽运光入射,则闲频光的初始相位将自动调整为 $\varphi_i(0) = \varphi_p(0) - \varphi_s(0) - \pi/2$,使信号光的增益达到最大。如果没有走离效应,则正如文献[12]中所描述的那样, θ 角空间分布均匀,放大的信号光的波前相位与抽运光无关,抽运光的波前相位存在畸变时,信号光仍旧能保持较好的光束质量。当作用光波之间存在走离效应时,作用光波之间的波前相位在走离方向上有移动, θ 角空间分布将不再均匀,作用光波之间的波前相位将产生耦合,抽运光波前相位畸变将传递到信号光上,导致放大的信号光光束质量下降。

采用分步傅里叶变换算法数值求解耦合波方程,在空间、时间域内计算三波非线性耦合项,在空间频域内计算走离和衍射效应^[13]。在神光Ⅱ第九路拍瓦装置前端 OPCPA 系统中,对前端 OPCPA 的光束质量提出的指标是好于 2 倍衍射极限,而且光束近场均匀性好,尽可能地减小波前畸变和近场调制,理想光束的要求是近场振幅分布均匀,无波前畸变(平面波)。种子激光脉冲由 Nd:glass 锁模激光器提供,波长 1053 nm,脉宽 220 fs,能量为 4 nJ,经过展宽器展宽到 3 ns,能量衰减到 500 pJ,脉冲时间、空间波形均接近高斯分布。抽运光由经过时间-空间整形的激光器系统提供,波长为 1064 nm 的单纵模光纤激光器提供的抽运种子激光脉冲,经过声光斩波和时间、空间预整形后^[14~16],进行 Nd:YAG 再生放大和多程放大,最后倍频,输出能量为 400 mJ、脉宽为 4 ns 的时间和空间波形均为超高斯分布的抽运激光脉冲。由于 LBO 晶体本身固有的特性,走离效应小,高损伤阈值,因此被选作光参变放大作用晶体。拍瓦激光器前端采用高增益放大和功率放大两级 OPA,信号光的光束质量变差通常集中在高增益放大阶段,因此本文只模拟高增益 OPA 放大阶段。在数值计算过程中,抽运激光脉冲时间、空间分布均呈超高斯分布,在这里用 10 阶超高斯分布模拟抽运激光脉冲时间、空间分布。在 OPA 高增益放大阶段,抽运光输入能量为 130 mJ,信号光输入能量为 500 pJ,光斑直径半峰全宽为 2 mm。LBO 晶体长度为 60 mm,光束在 LBO 晶体 X-Y

面内传播,抽运光走离角 0.42° ,信号光与抽运光波矢量夹角为 0.5° [6]。

3 非理想光束的 M^2 因子和光束近场不均匀度

与理想光束相比,非理想光束的近场分布不再均匀,波前存在畸变,因此光束的“质心”与光束的中心不再重合。在(1)式中, y 方向代表了走离方向,考虑到光束倾斜和光束“质心”偏移后,非理想光束走离方向的 M^2 因子为[17, 18]

$$M_y^2(t) = 4\pi\sigma_{0y}(t)\sigma_{ty}(t), \quad (3)$$

其中 $\sigma_{0y}(t)$ 为空间分布均方差,表示光束的束腰半径, $\sigma_{ty}(t)$ 为空间频域分布的均方差,反映光场相位分布特性。垂直走离方向的 $M_x^2(t)$ 的定义与(2)式类似。对于理想的高斯光束 M^2 等于 1,任何存在近场调制和波前畸变的非理想光束的 M^2 因子均大于 1。

用光束近场不均匀度来描述光束近场调制,其公式为

$$\sigma_y^{\text{rms}}(x, z, t) = \left\{ \frac{\langle [I(x, z, t) - \bar{I}(x, z, t)]^2 \rangle}{\bar{I}(x, z, t)} \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

$\sigma_y^{\text{rms}}(x, z, t)$ 表示 t 时刻、 x, z 点处 y 方向光束不均匀度, $\bar{I}(x, z, t)$ 表示 t 时刻、 x, z 点处 y 方向平均光强度, $\langle \rangle$ 表示对括号内的物理量取平均。用同样的计算过程可以得到 $\sigma_x^{\text{rms}}(y, z, t)$, 表示 t 时刻、 y, z 点处 x 方向光束不均匀度。

4 数值计算结果及讨论

在参变作用过程中,抽运光空间分布不均匀只会导致信号光近场调制,对信号光波前没有影响。人为给抽运光添加一畸变波前,假定抽运光开始空间强度分布是均匀的,在衍射的作用下将产生近场调制。由于晶体生长过程中的体内瑕疵导致的抽运光波前畸变通常在 $0.5\lambda \sim 5\lambda$ 左右[19],假定抽运光波前畸变 PV 值为 0.6λ ,如图 1 所示,信号光波前近似为平面。用准四维模拟程序来分析光参变放大过程中的光束质量变化、空间-时间波形和能量转换过程,利用该程序还可以分析 OPA 输出能量稳定性和 OPA 放大的信号光再压缩后的信噪比等。在上述给定的光参变放大条件下,参变放大已进入饱和状态,图 2 所示为光斑中心处信号光强度和抽运光强度随放大介质长度的变化,强度变化已用抽运光最大光强度归一化处理。从图中可以看出在晶体作

用长度 55 mm 处,能量已经部分开始反转,最高增益可达 10^8 。为了考察衍射效应和走离效应所起的不同作用,分别考察只有衍射效应和只有走离效应以及两者共同作用时信号光光束质量的下降过程。

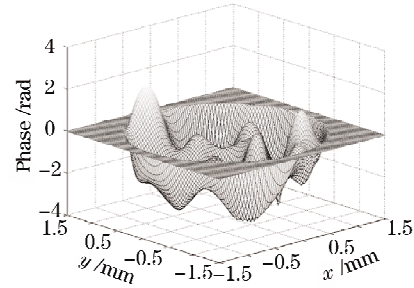


图 1 抽运光波前畸变

Fig. 1 Wave-front distortion of pump laser pulse

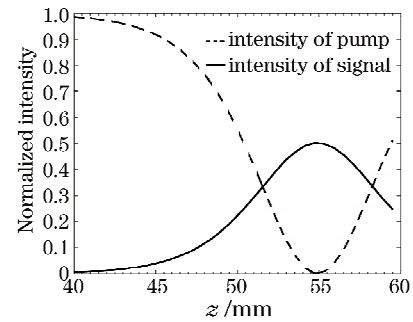


图 2 抽运光和信号光强度随放大介质长度的变化

Fig. 2 The pump and signal intensity versus crystal length

4.1 只考虑衍射作用

在参变作用过程中,只考虑衍射效应,不考虑走离效应,考察参变放大后信号光的光束质量。图 3 为放大后信号光的波前分布,从图中可以看出,在不考虑走离效应的情况下,放大后信号光的波前不存在畸变,在光束光斑边缘处,抽运光是超高斯分布,其光场振幅迅速衰减为零,而信号光是高斯分布,有

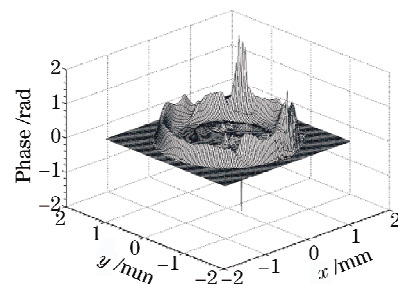


图 3 只考虑衍射效应时放大后信号光的波前分布
Fig. 3 Wavefront distribution of the amplified signal with only diffraction effects

一个渐变衰减,信号光能量向抽运光转移,导致信号光波前呈圆筒状分布。由于光参变放大过程中,信号光能量增益很高,OPA 进入饱和放大状态,其光场空间高斯分布被整形为超高斯分布,因此边缘处的筒状波前对光束质量影响很小,可以忽略。图 4 为信号光时间积分光斑强度分布,由于初始抽运光波前存在畸变,在晶体中传输时,存在很强的衍射效应,导致严重的近场调制,光束空间分布不再均匀,又由于二阶非线性效应,抽运光近场调制被传递到信号光,导致信号光近场质量变差。图 5 为过光斑中心点的信号光光强的一维分布,近场调制相当严重。激光脉冲时间对称分布在 $t = 0$ 时刻,则信号光在 $t = 0$ 时刻, $z = 60$ mm 处, x, y 向 M^2 因子分别为 3.54 和 3.8,过 $x = 0, y = 0$ 点, x, y 向光场不均匀度分别为 28.7% 和 29%。在只考虑衍射作用的条件下,两个相互垂直方向的 M^2 因子和近场调制是相当接近的,光束质量下降主要是抽运光衍射产生严重的近场调制通过 OPA 耦合到信号光和过饱和效应所导致的。

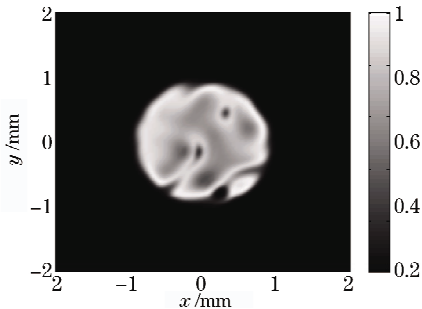


图 4 只考虑衍射效应时信号光时间积分光斑强度分布
Fig. 4 Temporally integrated signal spot with diffraction effects only considered

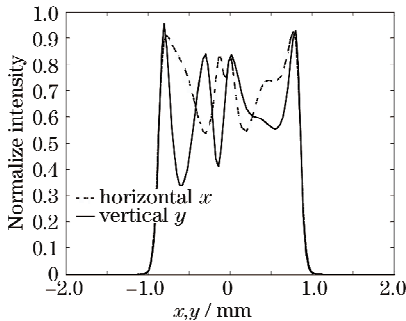


图 5 只考虑衍射效应时将激光脉冲强度时间积分后过光斑中心点的时间积分强度的空间一维分布
Fig. 5 One-dimensional normalized horizontal and vertical lineout distributions through the center of temporally integrated beam intensity with diffraction effects only considered

4.2 只考虑走离效应

在参变作用过程中,只考虑走离效应,不考虑衍射效应,考察参变放大后信号光的光束质量。图 6 为放大后信号光的波前分布,波前畸变 PV 值为 0.59λ ,由于走离效应的存在,抽运光的波前畸变传递到信号光上,信号光的波前畸变程度与抽运光的非常接近,与图 3 相比,可以看出,信号光的波前畸变主要是走离效应导致的,只要作用光束之间的波印廷矢量存在夹角,走离效应就不可避免,波前畸变就会在参变作用光波之间相互耦合。图 7 为信号光时间积分光斑强度分布。图 8 为时间强度积分光斑中心点的空间一维分布,强度分布在走离方向逐渐变强。实线为走离方向 y 强度分布,从图中可以看出由于走离的影响,能量在走离方向集中,导致光束近场质量变差,虚线为 x 方向的强度分布,由于 OPA 工作在过饱和状态,能量转换已经反转,强度分布呈现中间凹陷。信号光在 $t = 0$ 时刻, $z = 60$ mm 处, M_x^2, M_y^2 分别为 3.9 和 5,过 $x = 0, y = 0$ 点, $\sigma_x^{rms}, \sigma_y^{rms}$ 分别为 28.6% 和 33%。 M_y^2 比 M_x^2 大的原因是走离方向近场调制比其垂直方向更为严重,参变放大作用在饱和状态,光束能量向走离方向集中,光束在走离方向分布不再对称,垂直于走离方向的光束中心处

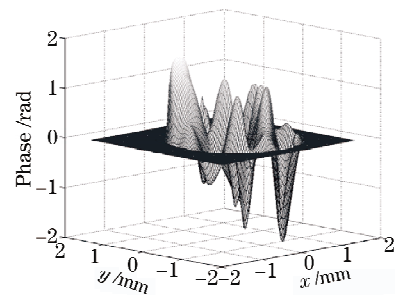


图 6 只考虑走离效应时放大后信号光的波前分布
Fig. 6 Wave-front distribution of the amplified signal with walk-off effects only considered

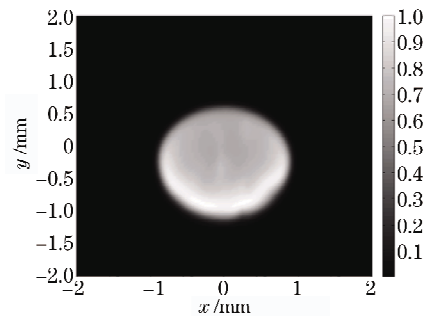


图 7 信号光时间积分光斑强度分布
Fig. 7 Temporally integrated signal spot with walk-off effects only considered

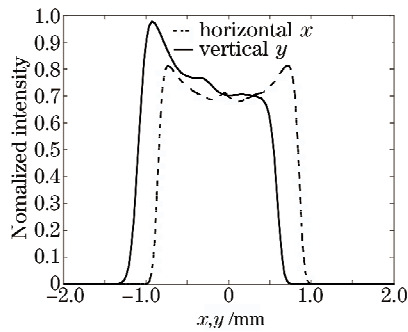


图 8 过光斑中心点的时间积分强度的空间一维分布

Fig. 8 One-dimensional distributions of temporally integrated beam intensity with walk-off effects only considered

能量部分反转,光斑中心凹陷,在垂直于走离方向的分佈仍然是对称的。

4.3 衍射效应和走离效应均考虑

OPA 过程中,同时考虑衍射效应和走离效应,考察参变放大后信号光的光束质量。图 9 给出了信号光放大后的波前畸变,波前畸变 PV 值为 0.63λ ,与图 3 和图 6 相比,光束波前畸变变化不大。图 10 和图 11 分别为信号光时间强度积分光斑分布和空间一维强度分布。信号光在 $t = 0$ 时刻, $z = 60$ mm 处, M_x^2, M_y^2 分别为 4 和 5,过 $x = 0, y = 0$ 点, $\sigma_x^{\text{rms}}, \sigma_y^{\text{rms}}$ 分别为 28.8% 和 33%。当只考虑走离效应和同时考虑走离和衍射效应时,信号光的 M^2 因子有近乎相同的值,原因是,OPA 工作在饱和状态,信号光的能量反转,向抽运光转移,此时,光束近场相互耦合导致信号光强度空间分布凹陷,导致光束质量急剧下降,超越衍射效应和走离效应对光束质量的影响,过饱和导致的光束强度空间分布凹陷成为导致光束质量变差的主要原因。考察 M^2 因子随晶体作用长度(或增益)的变化,可以更加清楚信号光光束质量下降过程中走离效应、衍射效应和过饱和效应所起的作用,图 12 为信号光 M^2 因子随作用晶体长度的变化,当只考虑走离效应和同时考虑走离和衍射效应时,光束质量因子随晶体作用长度的变化曲线很接近,从图中可以看出,在抽运光存在严重的波前畸变的条件下,参变作用未饱和时,走离效应对信号光光束质量的影响更大,在导致信号光光束质量下降的过程中起着主导作用。在晶体作用长度 55 mm 处,光束质量下降相比较慢,作用长度继续增加时,下降的趋势变得更快,导致这一变化的原因是,作用长度为 55 mm 处,参变作用能量转换已经部分开始,参变作用处于饱和状态,见图 2,作用光波间的强度耦合减缓了光束近场质量

下降的速度,长度继续增加时由于参变作用过饱和使信号光的近场呈中间凹陷分布,成为导致光束质量迅速下降的主要因素。

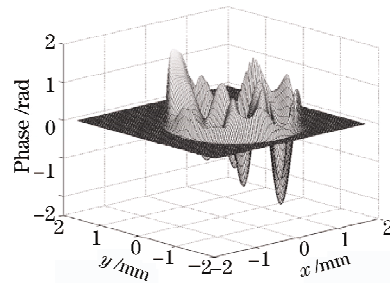


图 9 衍射和走离效应均考虑时放大后信号光的波前分布

Fig. 9 Wave-front distribution of the amplified signal with diffraction and walk-off effects considered

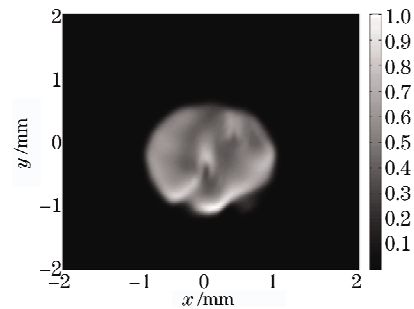


图 10 衍射和走离效应均考虑时信号光强度时间积分光斑分布

Fig. 10 Temporally integrated signal output beam intensity with diffraction and walk-off effects considered

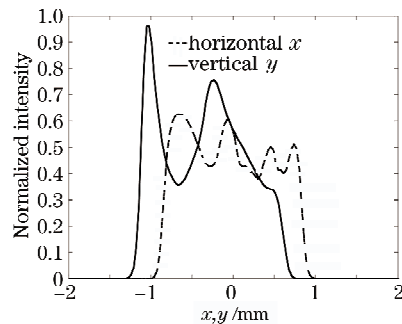


图 11 衍射和走离效应均考虑时,过光斑中心点的时间强度积分的空间一维分布

Fig. 11 One-dimensional distributions of temporally integrated beam intensity with diffraction and walk-off effects considered

综上所述,由上面的计算结果可以看出,OPA 过程中,在抽运光存在严重的波前畸变条件下,当参变作用未达到饱和时,由于衍射效应和走离效应的存在将导致信号光光束质量急剧下降,但它们导致信号光光束质量变差的物理过程并不相同,并且走

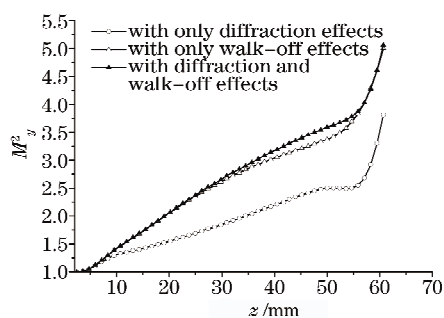


图 12 信号光脉冲时间中心点处的 $M_y^2(0)$ 随参量作用晶体长度的变化

Fig. 12 $M_y^2(0)$ at the temporal center of signal pulse versus crystal length

离效应起主导作用。衍射效应导致非理想光束通过衍射产生近场光场调制,而这种近场光场起伏将通过参变作用相互耦合,使得信号光近场分布质量变差,从而导致光束质量的下降。走离效应是通过把抽运光的波前畸变传递到信号光上,造成信号光远场光束质量变差,当 OPA 工作在接近饱和状态时,走离效应也将导致光束近场分布变坏,从而导致光束质量变差。当 OPA 工作在过饱和状态时,过饱和效应导致的信号光强度空间分布呈中心凹陷状,使得 M^2 因子急剧增加,过饱和效应超越衍射和走离效应,成为光束质量下降的主要因素。

5 结 论

通过数值求解光参变放大耦合波方程,模拟了拍瓦激光器前端系统非共线 OPA 过程中存在波前畸变的抽运光对信号光光束质量的影响,结果表明,当 OPA 工作在未饱和状态时,衍射效应和走离效应通过不同的物理机制导致了信号光光束质量的急剧下降,其中走离效应在导致信号光光束质量下降的过程中起着主导作用。当 OPA 工作在过饱和状态时,过饱和效应导致的信号光空间强度分布凹陷成为光束质量下降的主要因素。对于非共线 OPA 过程,信号光和闲频光波矢方向总是存在一定夹角,即使晶体采用走离补偿放置,走离效应也难以避免,因此为了提高前端 OPCPA 的光束质量,必须严格控制抽运光的光束质量,减小抽运光的波前畸变和光束近场调制。

参 考 文 献

1 Peng Hiansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences (I) [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 721~728
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. 中国激

光, 2006, **33**(6): 721~729
2 C. Dorrer, I. A. Begishev, A. V. Okishev *et al.*. High-contrast optical-parametric amplifier as a front end of high-power laser systems[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2143~2145
3 I. N. Ross, J. L. Collier, P. Matousek *et al.*. Generation of terawatt pulses by use of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(5): 2422~2427
4 I. Jovanovic, B. J. Comaskey, D. M. Pennington. Angular effects and beam quality in optical parametric amplification[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(9): 4328~4337
5 I. Jovanovic, B. J. Comaskey, C. A. Ebberts *et al.*. Optical parametric chirped-pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15): 2923~2929
6 M. J. Guardalben, J. Keegan, L. J. Waxer *et al.*. Design of a highly stable, high-conversion-efficiency, optical parametric chirped-pulse amplification system with good beam quality[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2511~2524
7 H. Yoshida, E. Ishii, R. Kodama *et al.*. High-power and high-contrast optical parametric chirped pulse amplification in beta-BaB₂O₄ crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 257~259
8 V. Bagnoud, I. A. Begishev, M. J. Guardalben *et al.*. 5 Hz, > 250 mJ optical parametric chirped-pulse amplifier at 1053 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1843~1845
9 C. Dorrer. Analysis of pump-induced temporal contrast degradation in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(12): 3048~3057
10 R. Baumgartner, R. Byer. Optical parametric amplification[J]. *IEEE J. Quant. Electron.* 1979, **15**(6): 432~444
11 D. Eimerl, J. M. Auerbach, P. W. Milonni. Paraxial wave theory of second and third harmonic generation in uniaxial crystals 1. narrow-band pump fields[J]. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**(5): 1037~1067
12 I. N. Ross, P. Matousek. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(12): 2945~2956
13 W. M. Peter, J. A. Jerome, D. Eavid. Frequency-conversion modeling with spatially and temporally varying beams[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 230~241
14 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704
杨向通, 范 薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704
15 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun *et al.*. Spatial laser beams shaping using binary panels [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1959~1966
谢 杰, 范 薇, 李学春等. 二元振幅型面板用于光束空间整形 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1959~1966
16 Wang Yanhai, Wang Jiangfeng, Li Xuechun. Laser pulse shaping and modification techniques in front-end of high-power laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 477~481
王艳海, 王江峰, 李学春. 高功率激光装置前端系统激光脉冲的时间整形及修正技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 477~481
17 A. V. Smith, M. S. Bowers. Phase distortions in sum-frequency and difference-frequency mixing in crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(1): 49~57
18 A. E. Siegman, G. Nemes, J. Serna. How to (maybe) measure laser beam quality [J]. *OAS Trends in Optics and Photonics*, 1998, **17**: MQ1
19 V. Bagnoud, M. J. Guardalben, J. Puth *et al.*. High-energy, high-average-power laser with Nd:YLF rods corrected by magnetorheological finishing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(2): 282~288