

惯性约束聚变驱动器终端束匀滑器件 前置时频率转换系统优化研究*

姚 欣 高福华[†] 高 博 张怡霄 黄利新 郭永康 林祥棣

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

(2008 年 12 月 1 日收到, 2008 年 12 月 8 日收到修改稿)

在惯性约束聚变驱动器终端光学系统中,束匀滑器件前置有许多优点,但它同时也将对频率转换系统的工作状态产生影响.从系统集成优化的观点研究了这种影响,并基于高强度激光非线性传输理论,采用耦合波方程组及微扰理论,模拟计算了连续相位板前置时基频光束通过频率转换系统的三倍频转换效率及出射光束的近远场分布和焦斑形态,提出了优化倍频晶体失谐角和晶体厚度以减小 CPP 前置对系统性能的影响.模拟计算了频率转换系统优化前后的三倍频转换效率、光束通量对比度和能量集中度,并进行了对比分析.分析结果表明,频率转换系统的优化对减小 CPP 前置对光束质量和三倍频转换效率的影响是十分有效的.

关键词:惯性约束聚变,频率转换系统,连续相位板,系统集成优化

PACC:4225,2410H,0350D

1. 引 言

在惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)驱动器终端光学系统中,目前普遍采用连续相位板(continuous phase plate, CPP)作为终端输出光束整形匀滑^[1]的关键器件.在美国劳伦兹-里弗莫尔实验室(LLNL)的 beamlet 等多种系统中均采用在频率转换系统后的 3ω 光路中放置 CPP 来实现束匀滑(以下简称后置,图 1(a)),而 2003 年 LLNL 又提出在 NIF 系统中把 CPP 放置在频率转换系统之前的方案^[2](以下简称前置,图 1(b)).我们认为从工程和运行角度讲 CPP 前置较于后置有更多明显的优点,但

CPP 前置时其微浮雕结构必将对入射基频光的相位产生调制,从而使频率转换系统的出射光束质量和三倍频转换效率降低,不能满足在远场获得高功率和高均匀性的大尺寸聚焦光斑以实现聚变点火的要求.在文献 3 中我们已经指出,只要优化 CPP 的设计参数,对远场聚焦光斑的大小加以限制,就可使这种影响减小到许可范围之内.但是, CPP 的前置必将影响频率转换系统本身的工作状态,从而影响其输出光束的质量和三倍频转换效率.本文通过非线性频率转换耦合波方程组以及微扰理论,进一步分析研究 CPP 前置对频率转换系统工作状态的影响,在此基础上优化频率转换系统的设计,以提高其三倍频转换效率,使能量利用率进一步提高,并进一步改

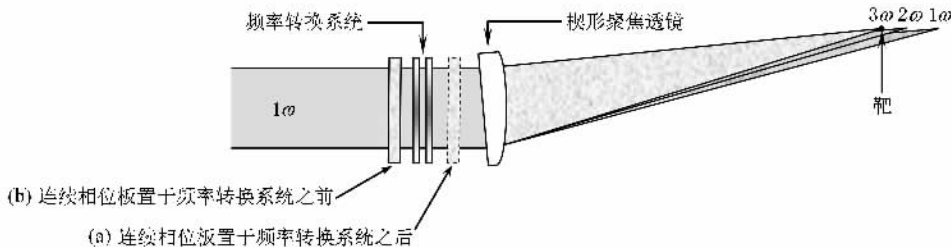


图 1 ICF 终端光学系统原理示意图

* 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 804)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: gaofuhua@scu.edu.cn

善近远场光束的特性,降低强激光诱导损伤的风险。

2. 物理模型

CPP前置时频率转换系统的优化,需要计算三倍频转换效率、频率转换后出射光场分布以及远场焦斑光场分布,然而基频光经CPP再经频率转换系统后的输出是一个复杂的非线性过程,在数值计算时,应考虑多种因素的影响。将相位缓变的衍射光学元件CPP前置时对基频光束产生的较小的相位调制看成附加于光束上的相位微扰,并考虑了三波混频、近轴衍射、横向空间离散效应、三阶非线性效应以及晶体吸收等因素后得到采用I/II类角度失谐方案的单轴晶体耦合波方程组^[4-7],其中对于I类匹配二倍频耦合波方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{10}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_1} \nabla^2 E_{10} + \frac{i\omega}{2n_1 c} \bar{\chi} E_{2e} E_{10}^* e^{i\Delta k z} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha_1 E_{10} + \frac{i\epsilon_0 n_1 \omega}{2} \cdot [\gamma_{11} |E_{10}|^2 \\ &\quad + 2\gamma_{12} |E_{2e}|^2] E_{10}, \\ \frac{\partial E_{2e}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_2} \nabla^2 E_{2e} - \rho_2 \frac{\partial E_{2e}}{\partial y} + \frac{i\omega}{2n_2 c} \bar{\chi} E_{1e}^2 e^{-i\Delta k z} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha_2 E_{2e} + \frac{i2\epsilon_0 n_1 \omega}{2} \cdot [2\gamma_{21} |E_{10}|^2 \\ &\quad + \gamma_{22} |E_{2e}|^2] E_{2e}. \end{aligned} \quad (1)$$

对于II类匹配三倍频耦合波方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{1e}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_2} \nabla^2 E_{1e} - \rho_1 \frac{\partial E_{1e}}{\partial y} + \frac{i\omega}{2n_1 c} \bar{\chi} E_{3e} E_{20}^* e^{i\Delta k z} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha_1 E_{1e} + \frac{i\epsilon_0 n_1 \omega}{2} [\gamma_{11} |E_{1e}|^2 \\ &\quad + 2\gamma_{12} |E_{10}|^2 + 2\gamma_{13} |E_{2e}|^2] E_{1e}, \\ \frac{\partial E_{20}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_2} \nabla^2 E_{20} + \frac{i2\omega}{2n_2 c} \bar{\chi} E_{3e} E_{1e}^* e^{i\Delta k z} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha_2 E_{20} + \frac{i\epsilon_0 n_2 \omega}{2} \\ &\quad \times [2\gamma_{21} |E_{1e}|^2 + \gamma_{22} |E_{10}|^2 \\ &\quad + 2\gamma_{23} |E_{2e}|^2] E_{20}, \\ \frac{\partial E_{3e}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_3} \nabla^2 E_{3e} - \rho_3 \frac{\partial E_{3e}}{\partial y} \\ &\quad + \frac{i3\omega}{2n_3 c} \bar{\chi} E_{1e} E_{20} e^{i\Delta k z} - \frac{1}{2} \alpha_3 E_{3e} \\ &\quad + \frac{i\epsilon_0 n_3 \omega}{2} [2\gamma_{31} |E_{1e}|^2 \\ &\quad + 2\gamma_{32} |E_{10}|^2 + \gamma_{33} |E_{2e}|^2] E_{3e}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 E_{i0} 或 E_{ie} ($i=1, 2, 3$), 分别表示基频、二倍频、三倍频 o 光或 e 光的复振幅, $\rho_i = \frac{1}{n_i(\omega, \theta)}$ $\frac{\partial n_i(\omega, \theta)}{\partial \theta}$ 是离散因子, $\bar{\chi}$ 是有效非线性系数, γ_{ij} 是三阶非线性折射率系数, Δk 是相位失谐量, α_i 是吸收系数。

根据上式和系统的已知参数,就可计算得到CPP前置时,频率转换系统的三倍频转换效率及近场出射光束和远场焦斑的光强分布。同时为了定量分析近场出射的三倍频光束均匀性和远场焦斑特性,引入光束通量对比度和能量集中度两个量,其定义如下。

光束通量对比度 它表示加入CPP以后的出射光束的实际光强 I_{ij} 与理想光强 I_p 的平均差异同理想出射光束光强平均值 I_{avg} 的比率

$$C = \frac{1}{I_{avg}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_{ij} - I_p)^2}{N^2}}, \quad (3)$$

式中 N^2 为出射平面抽样点数。光束通量对比度是一个统计平均参数,它定量描述了光束近场的大面积均匀性,能够反映高强度激光束传输过程中,光束受到调制的情况。

能量集中度 它表示在某一个确定大小的横截面 s 内的能量占总能量 E_{total} 的百分比

$$\eta = \frac{\iint_s E dx dy}{E_{total}}, \quad (4)$$

它可评价远场焦斑能量分布的状况。

3. 频率转换系统优化设计及结果分析

CPP前置必将对频率转换系统的工作状态产生影响,为了获得较高的三倍频转换效率和较好的出射光束质量,必须对频率转换系统的参数进行优化。对于三倍频转换效率而言,如果采用I/II类角度失谐方案,可以通过选择失谐角和晶体的厚度来控制频率转换系统的工作状态,使三倍频转换效率最高。而为了改善出射光束质量则需要引入非线性微扰理论^[8]进行分析。利用微扰理论,经计算得到基频光的扰动和三倍频光的扰动存在以下关系:

$$\rho'_R = \Lambda \rho_R + \pi \cdot \nabla \rho_1, \quad (5)$$

$$\rho'_i = \nu \rho_R + (3 + \mu \cdot \nabla) \rho_1, \quad (6)$$

(5)(6)式被称作非线性过程微扰传输映象模式。 ρ_R 和 ρ_1 分别为基频光的振幅调制和相位扰动。 ρ'_R 和 ρ'_1 分别为三倍频光的振幅调制和相位扰动。式中 Δ 、 π 、 ν 、 μ 是与入射基频光强度和频率转换晶体性质相关的参量。(5)式中的 Δ 是与频率转换系统工作状态有关的,当基频光功率密度较小时, $\Delta > 1$;激光器在转换效率峰值运行时, Δ 约等于1;而当基频光功率密度继续增加时,三倍频转换效率随之下降, $\Delta < 1$ 。对于 π ,一般来说只有在失谐角的改变使得转换效率最高时其量级才小于 10^{-6} ,因此这种情况下可以忽略此项。即在转换效率峰值运行时,三倍频光的振幅扰动主要来源于基频光的振幅扰动。(6)式中的 ν 在正常工作情况下远小于3, μ 的量级也小于 10^{-6} 。因此,通常认为三倍频光的相位扰动近似放大为基频光相位扰动的三倍。结合以上分析,在频率转换过程中,同时考虑非线性微扰传输和衍射效应时,前置CPP附加的相位扰动 ρ_1 在非线性过程中会不断放大使三种谐波在衍射传输过程中均产生振幅调制 ρ_R ,导致光束质量变差。但是,在一定入射基频光功率密度的情况下,可以通过调节倍频晶体失谐角和晶体厚度使频率转换系统工作在转换效率峰值附近,三倍频转换效率最高。根据(5)式,因为这时

Δ 约等于1, π 可以忽略,所以振幅调制 ρ_R 不会被放大,出射光束振幅调制 ρ'_R 较小,因此出射三倍频光束的质量也较好^[9]。

3.1. 倍频晶体失谐角的选择

在采用I/II类角度失谐三倍频方案时,首先考虑调整倍频晶体失谐角。国内外众多相关文献^[2,10,11]报道后置CPP时,都是采用二倍频KDP晶体失谐角为 $220 \mu\text{rad}$ 方案,而对于前置CPP系统,应该重新确定二倍频KDP晶体失谐角以达到优化的目的。设ICF系统参数如下:钕玻璃激光器输出直径为 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$ 、波长 $\lambda_{1\omega} = 1.053 \mu\text{m}$ 、光强为 2 GW/cm^2 的8阶理想超高斯基频光束。频率转换系统的二倍频、三倍频KDP晶体厚度分别为 13.48 mm 和 11.26 mm ,其非线性系数 $\chi = 0.78 \text{ pm/V}$,三种频率光波吸收系数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为 $0.043/\text{cm}, 0.005/\text{cm}, 0.005/\text{cm}$ 。频率转换系统之前加入一个能在远场靶点形成直径为 0.5 mm 焦斑的CPP,考虑吸收、衍射和离散效应忽略三阶及更高阶非线性效应,通过解耦合波方程组计算得到三倍频转换效率与晶体失谐角度的关系以及系统出射光束光强分布情况分别如图2和图3所示。

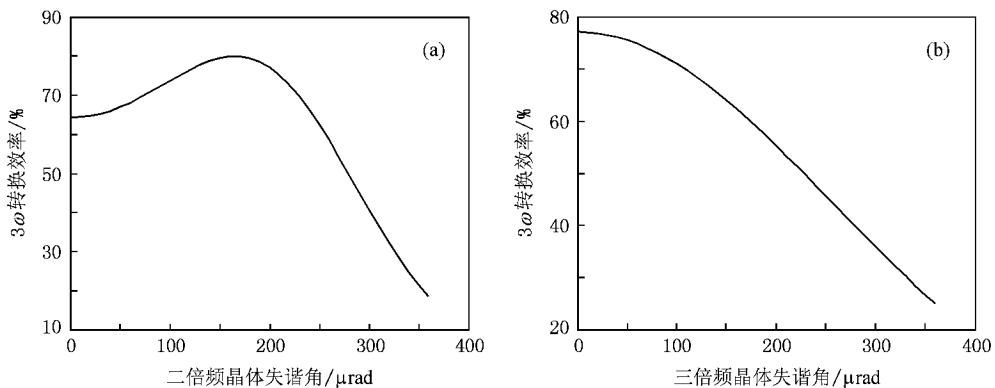


图2 三倍频转换效率对晶体失谐角调谐曲线

图2为频率转换系统三倍频转换效率对倍频晶体失谐角的调谐曲线,显示了在 2 GW/cm^2 的条件下CPP前置时,三倍频转换效率对二倍频晶体和三倍频晶体失谐角 $\Delta\theta_2$ 和 $\Delta\theta_3$ 的敏感程度。通过图2(a)可知,当二倍频晶体失谐角 $\Delta\theta_2$ 为 $174 \mu\text{rad}$ 时三倍频转换效率最高,且在其附近较大范围内转换效率均保持缓慢变化,而随着失谐角 $\Delta\theta_2$ 偏离的增大转换效率急剧下降;由图2(b)可知三倍频晶体失谐角

$\Delta\theta_3$ 为0时,三倍频转换效率最高,随着 $\Delta\theta_3$ 的增大,转换效率呈单调下降趋势。因此若选择 $\Delta\theta_2 = 174 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_3 = 0$,系统工作在峰值附近,可使CPP前置带来的位相扰动对三倍频转换效率的影响降至最低。

采用上述方案,倍频失谐角优化前后的三倍频晶体出射处横截面上 x 方向中心附近的光场强度分布分别如图3(a)(b);利用光束衍射传输公式得到优化前后远场焦斑径向光强分布分别如图4

(a)(b). 优化前后的三倍频转换效率、近场出射光束通量对比度和远场焦斑能量集中度的对比情况见表 1. 通过对比可以看出, 由于失谐角的优化使频率转换系统工作在转换效率峰值附近, 非线性过程中的振幅调制不被放大. 因此, 近场出射光束顶部调

制下降明显, 三倍频转换效率同时也有较大提高, 但远场焦斑的形状和大小均无明显变化, 其能量集中度也变化不大, 这是因为焦斑大小是由 CPP 的低频相位扰动所决定的, 一旦 CPP 确定其焦斑大小将不随失谐角的改变而变化.

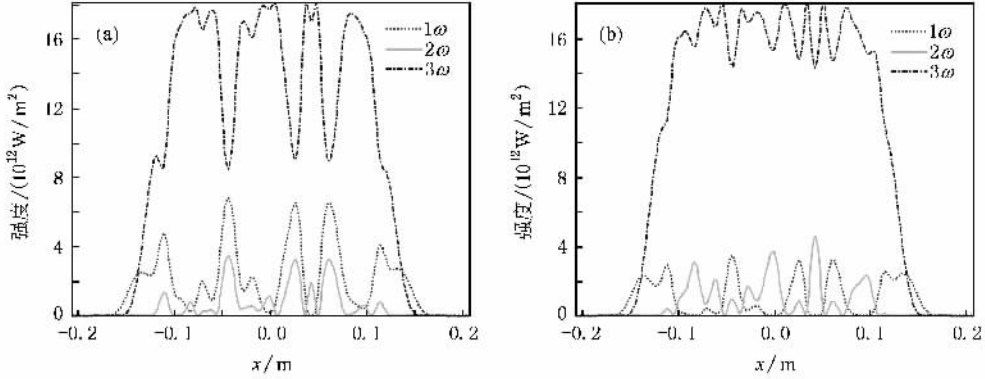


图 3 优化前后频率转换系统出射光场中心光强分布剖面图 (a) 优化前 ($\Delta\theta_2 = 220 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_3 = 0 \mu\text{rad}$) (b) 优化后 ($\Delta\theta_2 = 174 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_3 = 0 \mu\text{rad}$)

表 1 倍频失谐角优化前后光束特性对比

光学特性参数	优化前 ($\Delta\theta_2 = 220 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_3 = 0 \mu\text{rad}$)	优化后 ($\Delta\theta_2 = 174 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_3 = 0 \mu\text{rad}$)
三倍频转换效率/%	72.631	79.7382
近场出射光光束通量对比度	0.1754	0.0822
远场焦斑能量集中度/%	95.27	95.35

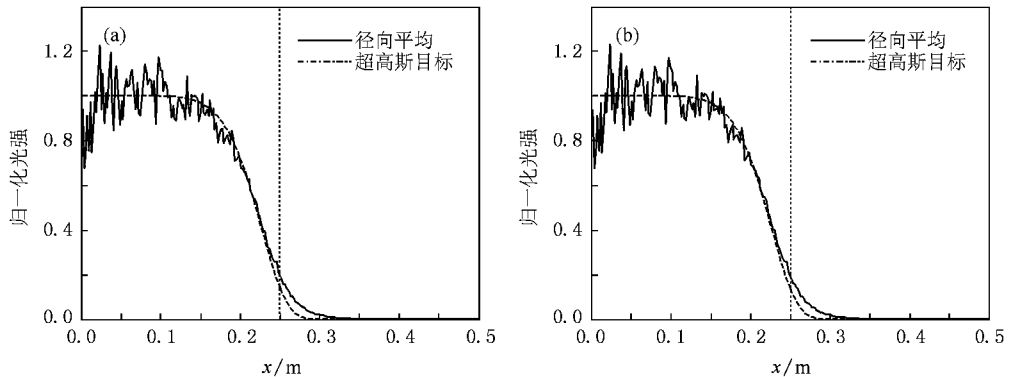


图 4 焦斑径向光强分布图 (a) 优化前 (b) 优化后

3.2. 频率转换晶体厚度的选择

在 CPP 前置的 ICF 终端光学系统中, 由于 CPP 对入射基频光附加的相位扰动引起波矢失谐量 Δk 增大, 而与 Δk 相关的相位扰动为 Δkz (z 为晶体厚度), 因此, 可适当减小晶体厚度来补偿 Δk 增大造成的转换效率下降和动态范围减小, 从而提高三倍

频转换效率和出射光束质量. 为此, 我们研究了晶体厚度与三倍频转换效率和出射光光束通量对比度的关系, 计算参数同 3.1 节, 采用失谐角度优化方案 ($\Delta\theta_2 = 174 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_3 = 0 \mu\text{rad}$) 后, 分别单独改变二倍频晶体和三倍频晶体的厚度, 解耦合波方程组得出三倍频转换效率和光束通量对比度与频率转换晶体厚度关系如图 5 所示.

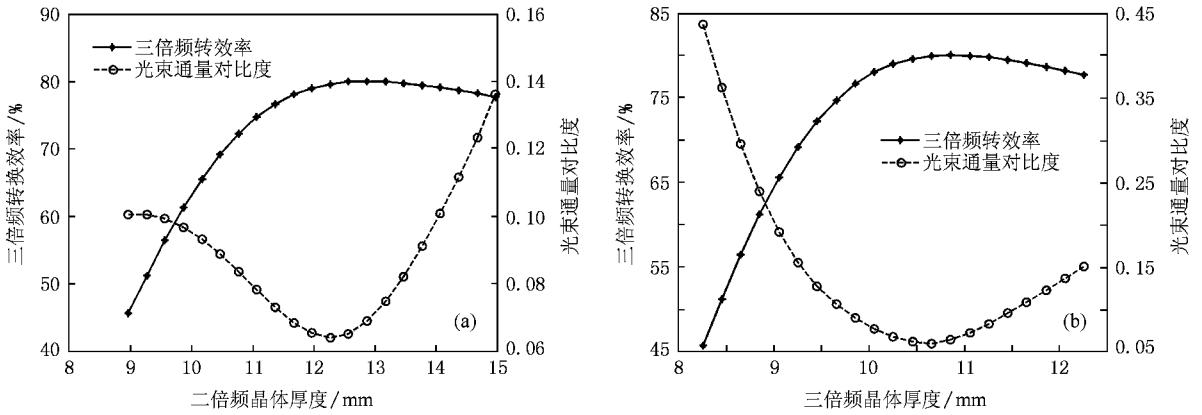


图 5 晶体厚度对三倍频转换效率和光通量对比度关系

由图 5 可以看出随着频率转换晶体厚度的增加,非线性作用距离增加,非线性转换效率也随之增加,但其变化速度明显地逐渐变慢.超过一定厚度,晶体吸收的能量大于非线性频率转换产生三次谐波能量,三倍频转换效率随之下降,由(5)(6)式的分析结果可知三倍频转换效率的下降将导致出射光束质量的下降.由图 5 可见,当二倍频晶体和三倍频晶体的厚度分别为 12.58 mm 和 10.86 mm 时能够使三倍频转换效率和光束通量对比度同时达到最优.晶体厚度优化前后的三倍频转换效率、近场出射光光

束通量对比度和远场焦斑能量集中度的对比情况见表 2.晶体厚度优化后的三倍频晶体出射处横截面 x 方向中心附近的强度分布如图 6(a)所示、远场焦斑形态如图 6(b)所示.通过表 2 并对比图 3(b)和图 6(a)可以看出,减小晶体厚度削弱了基频光相位扰动对三倍频转换效率和出射光束质量的影响,因此,近场出射光束振幅调制得到了一定程度的改善,三倍频转换效率也同时有所提高,而其远场焦斑几乎没有变化.

表 2 晶体厚度优化前后光束特性对比(已采用失谐角度优化方案)

光学特性参数	优化前($h_2 = 13.48 \text{ mm}, h_3 = 11.26 \text{ mm}$)	优化后($h_2 = 12.58 \text{ mm}, h_3 = 10.86 \text{ mm}$)
三倍频转换效率/%	79.7382	79.8977
近场出射光光束通量对比度	0.0822	0.0559
远场焦斑能量集中度/%	95.35	95.19

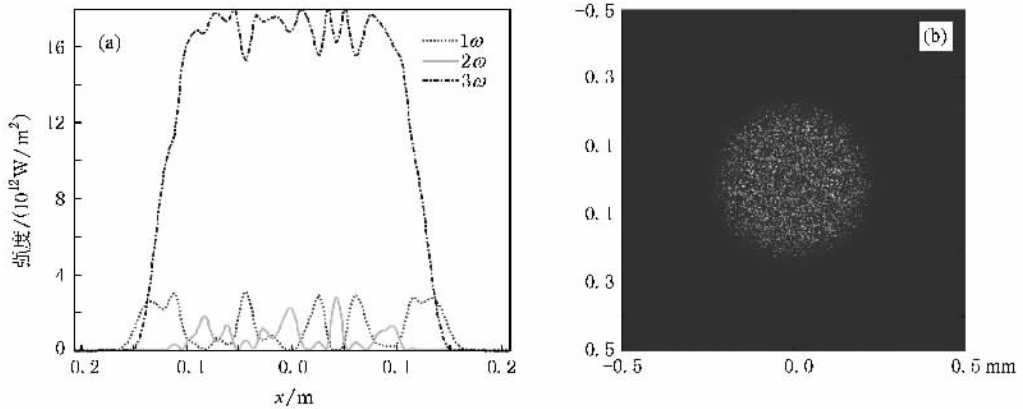


图 6 晶体厚度优化以后晶体出射横截面光强与焦斑光强分布图

4. 结 论

本文建立了 CPP 前置时 ICF 驱动器终端光学系统的物理模型,通过对非线性微扰理论映像公式的分析,提出了 CPP 前置时 ICF 终端频率转换系统的优化方案,并利用非线性耦合波方程组计算了优化

前后三倍频转换效率、出射光光束通量对比度和远场焦斑能量集中度等光学参量.模拟计算得出:当优化后的二倍频、三倍频晶体失谐角分别为 $174 \mu\text{rad}$ 和 0 ,厚度分别为 12.58 mm 和 10.86 mm 的时候可以大幅提高系统的三倍频转换效率和出射光束质量并能够在基本不改变焦斑形态和大小的前提下,仍然保持较高的远场焦斑能量集中度.

- [1] John A M 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 74
- [2] Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, Dixit S, Lawson J, Menapace J, Parham T, Swift D, Whitman P, Williams W 2004 *Proc. SPIE* **5341** 180
- [3] Yao X, Gao F H, Zhang Y X, Wen S L, Guo Y K, Lin X D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3130 (in Chinese) [姚 欣、高福华、张怡霄、温圣林、郭永康、林祥棣 2009 物理学报 **58** 3130]
- [4] Qian L J, Deng X M 1996 *Acta Opt. Sin.* **16** 1223 (in Chinese) [钱列加、邓锡铭 1996 光学学报 **16** 1223]
- [5] Williams W H, Auerbach J M, Hennesian M A, Lawson J K, Hunt J T, Sacks R A, Widmayer C C 1998 *Proc. SPIE* **3264** 93
- [6] Eimerl D, Auerbach J M, Milonni P W 1995 *J. Mod. Opt.* **42** 1037
- [7] Zhao S L, Zhu B Q, Zan T Y, Cai X J, Liu R H, Yang L, Zhang Z X, Bi J J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4170 (in Chinese) [赵书林、朱宝强、詹庭宇、蔡希洁、刘仁红、杨琳、张志祥、毕纪军 2006 物理学报 **55** 4170]
- [8] Auerbach J M, Eimerl D, Milam D, Milonni P W 1997 *Appl. Opt.* **36** 606
- [9] Zhang B, Li Q, Cai B W 2004 *Acta Photonica Sinica* **33** 553 (in Chinese) [张 彬、李 强、蔡邦维 2004 光子学报 **33** 553]
- [10] Yang Y S, Li Q, Zhang B 2005 *Chinese Journal of Lasers* **32** 1333 (in Chinese) [杨毅松、李 强、张 彬 2005 中国激光 **32** 1333]
- [11] Li K, Li K Y, Zhang B, Wang C C, Ma C 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1282 (in Chinese) [李 琨、李恪宇、张彬、王成程、马 驰 2006 强激光与粒子束 **18** 1282]

Optimization of frequency conversion system in inertial confinement fusion driver for frontally located beam smoothing elements^{*}

Yao Xin Gao Fu-Hua[†] Gao Bo Zhang Yi-Xiao Huang Li-Xin Guo Yong-Kang Lin Xiang-Di

(College of Physics Science and Technology , Sichuan University , Chengdu 610064 , China)

(Received 1 December 2008 ; revised manuscript received 8 December 2008)

Abstract

There are many advantages for frontally located beam smoothing elements in terminal optical system of the inertial confinement fusion(ICF) driver , but it will also exert an influence on the working state of the frequency conversion system at the same time. This paper studies the influence from the viewpoints of system integration and optimization. Based on the non-linear transmission theory of high power laser and adopting coupled-wave differential equations and perturbation theory , we calculate the third harmonic conversion efficiency , optical characteristics in near and far field as well as the shape of focal spot when CPP is laid before the frequency conversion system. Then we put forward the method for the optimization of detuning angle and thickness of the frequency conversion crystal , in order to reduce influence on ICF system when CPP is laid before the frequency conversion system. The third harmonic conversion efficiency , contrast ratio and encircled energy before and after optimization are compared and analyzed. The results show that the optimization of frequency conversion system is very effective in reducing the impact on the beam quality and the third harmonic conversion efficiency when CPP is laid before the frequency conversion system.

Keywords : inertial confinement fusion , frequency conversion system , continuous phase plate , system integrative optimization

PACC : 4225 , 2410H , 0350D

^{*} Project supported by the National High Technology Development (863) Program of China (Grant No. 804).

[†] Corresponding author. E-mail : gaofuhua@scu.edu.cn