

激光惯性约束聚变驱动器终端光学系统中 束匀滑器件前置的条件研究^{*}

姚欣¹⁾ 高福华^{1)†} 张怡霄¹⁾ 温圣林²⁾ 郭永康¹⁾ 林祥棣¹⁾

1) 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

2) 成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

(2008 年 10 月 14 日收到, 2008 年 10 月 21 日收到修改稿)

对激光惯性约束聚变(ICF)驱动器终端光学系统中连续相位板(CPP)的位置优化进行了研究. 根据高强度激光非线性及微扰传输理论计算了 CPP 前置时激光通过频率转换系统以后的近远场光束特性和系统的三倍频转换效率. 研究发现, 前置于基频光路的 CPP 对三倍频转换效率和出射光束特性均有影响, 但只要远场圆形焦斑直径小于 0.5 mm, 三倍频转换效率的下降与出射光束通量对比度的上升均在容许范围之内, 同时远场焦斑形态和能量集中度也符合设计要求. 对于实现远场小焦斑匀滑的 CPP 前置于 ICF 的基频光路中进行光束匀滑和整形, 不会对 ICF 系统的正常运行产生影响.

关键词: 连续相位板, 束匀滑元件, 惯性约束聚变, 光束通量对比度

PACC: 4225, 4260, 4265K

1. 引 言

激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)终端光学系统主要由频率转换、谐波分离、光束取样、束匀滑、聚焦等部分组成(如图 1)^[1-3], 它将前端输出的波长为 1.053 μm 的激光转换为 0.351 μm 的三次谐波再经匀滑聚焦后进入靶室. 由于激光惯性约束聚变的打靶实验对光束质量及聚焦光斑的特性有很高的要求, 从而对终端光学系统的元件和系统结构的特性有十分苛刻的要求. 关于终端光学系统元件的优化设计已有大量报道, 然而聚焦光斑特性不仅与元件的结构参数有关, 而且与系统的结构即多个元件的排布位置及使用状态有关, 这方面的研究却很少有报道. 例如在终端光学系统中, 目前普遍采用衍射光学元件 CPP 作为束匀滑元件, 这是因为 CPP 具有衍射效率高、设计灵活、可实现各种波面的整形等其他光学元件无可比拟的优点. 在 LLNL 的 beamlet 等多种系统中均采用在倍频系统后的 3ω 光路中放置 CPP 来实现束匀滑(以下简称后置)如

图 1(a)), 然而 2003 年 LLNL 又提出了在 NIF 系统中将 CPP 置于频率转换系统之前的光路安排(以下简称前置)如图 1(b))^[4], 至于为什么由后置改为前置则未见报道. 我们认为将 CPP 前置于频率转换系统之前的基频光路中, CPP 的基片可采用 K9 玻璃, 而不必采用价格昂贵的石英玻璃, 可以大幅降低制作成本, 而且前置会减少 3ω 光路中的反射面, 从而减少其产生的杂散光在光路中形成的多条鬼线对元件可能造成的损伤及对主光束质量的影响. 因此, 从工程和运行角度讲, 将 CPP 前置有明显的优点. 然而将 CPP 前置于基频光路, 其微浮雕结构必将对入射基频光的相位产生调制, 从而影响通过频率转换系统的出射光场以及其频率转换效率. 本文根据频率转换理论模拟计算了在 CPP 前置实现束匀滑的同时, 对近远场光束特性的影响, 以及焦斑大小与三倍频转换效率和光束特性之间的关系, 并分别采用光束通量对比度和能量集中度来描述. 从而可得出这种影响在许可范围之内的焦斑大小, 为前置 CPP 的设计提供理论依据.

^{*} 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

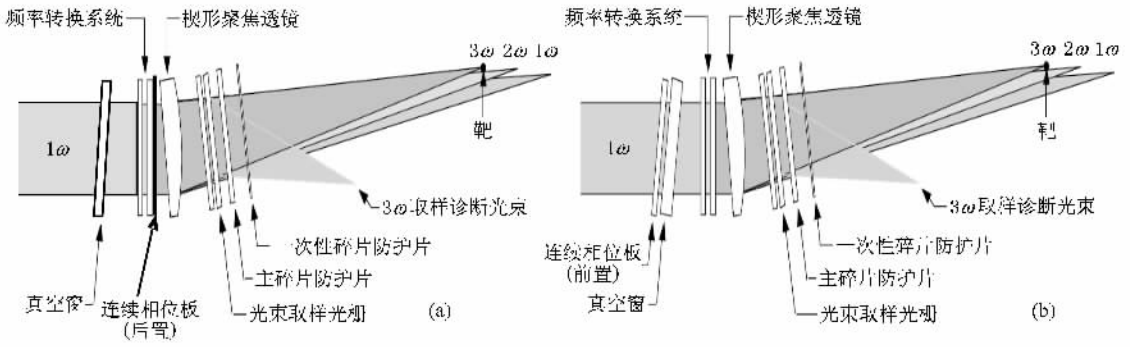


图1 ICF终端光学系统原理示意图

2. 物理模型

当 CPP 后置时, 它对其前面的变频晶体产生的非线性频率转换过程没有影响, 因此强激光束经过频率转换系统的过程可以直接采用高强度激光非线性理论进行计算; 但 CPP 作为一种相位缓变的衍射光学元件前置时, 会对进入频率转换系统之前的光束产生一个较小的相位调制, 在模拟计算时可以看到附加于光束上的相位微扰, 其对出射光场产生的影响可用非线性频率转换耦合波方程组^[5-8]结合微扰理论^[9]进行计算。

在高强度激光频率转换非线性过程中, 基于麦克斯韦方程组在主要考虑了三波混频、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物理过程后得出采用 I/II 类角度失谐方案的单轴晶体耦合波方程组的一般形式为^[10]

$$\frac{\partial E_i}{\partial z} = f(A, B, C) - \frac{1}{2} \alpha_i E_i + \frac{i}{2k_i} \nabla^2 E_i - \rho_i \frac{\partial E_i}{\partial y}, \quad (1)$$

式中, E_i 表示复振幅, ρ_i 是离散因子, α_i 是吸收系数, $i=1, 2, 3$ 分别对应于基频光、二倍频光和三倍频光。(1)式中左边表示光场复振幅在 z 方向的变化, 右边第一项表示非线性转换, 包括二阶和三阶非线性效应, 第二项表示晶体的吸收, 第三项表示光场的衍射效应, 第四项表示离散效应。

前置 CPP 对入射基频光附加的相位微扰经过频率转换系统后的相位变换关系可以通过微扰传输理论得到。设基频光场为

$$E(\mathbf{r}) = E_0 [1 + \rho(\mathbf{r})], \quad (2)$$

式中 $\rho = \rho_R + i\rho_I$ 为基频光扰动, ρ_R 和 ρ_I 分别为基频光的振幅调制和相位扰动。忽略更高阶的扰动, 经

过频率转换元件后, 出射的三倍频光场为

$$E_{3\omega} = E_{3\omega 0} [1 + \rho'(\mathbf{r})], \quad (3)$$

式中 $\rho' = \rho'_R + i\rho'_I$ 为三倍频光扰动, ρ'_R 和 ρ'_I 分别为三倍频光的振幅调制和相位扰动。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^[9]:

$$\rho'_R = \Delta \rho_R + \pi \cdot \nabla \rho_I, \quad (4)$$

$$\rho'_I = \nu \rho_R + (3 + \mu \cdot \nabla) \rho_I. \quad (5)$$

(4)(5)式被称作微扰传输映象模式。式中 Δ, π, ν, μ 是与入射基频光强度和频率转换晶体相关的数值。在实际情况下, 激光装置在转换效率峰值附近运行时 Δ 约等于 1, 完全相位匹配时 π 的量级小于 10^{-6} , 所以基频光经过频率转换后, 它的强度扰动分布近似保持不变, ν 在正常工作情况下远小于 3, μ 的量级小于 10^{-6} 。因此, 通常认为三倍频光的相位扰动近似于基频光相位扰动的三倍。

根据以上模型利用非线性和微扰传输理论, 就能计算得到前置 CPP 时, ICF 终端光学系统三倍频转换效率以及近场出射光束和远场焦斑的光强分布。另外通过计算光束通量对比度和能量集中度可以分别对近场出射的三倍频光束均匀性和远场焦斑特性进行定量的分析。

定义光束通量对比度为

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_{ij} - I_p)^2}{N^2}}, \quad (6)$$

式中, I_p 为理想出射光束光强, I_{ij} 为加入 CPP 以后的出射光束实际光强, I_{avg} 为理想出射光束光强平均值。光束通量对比度是一个统计参数, 它定量地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, 是强激光束特性重要的评价因子之一。

定义能量集中度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,用 η 表示为

$$\eta = \frac{\iint_s E dx dy}{E_{total}}, \quad (7)$$

它是评价远场焦斑能量分布的一个重要指标.

3. 数值计算和结果分析

3.1. CPP 前置对 ICF 终端光学系统光场的影响

针对 ICF 系统进行了频率转换数值模拟计算,计算所用参数如下:钕玻璃激光器输出光束直径为 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$,波长为 $\lambda_{1\omega} = 1.053 \text{ }\mu\text{m}$,并假设光束为 8 阶理想超高斯光束(如图 2 所示),其输出光强为 2 GW/cm^2 ,频率转换系统的二倍频、三倍频晶体 KDP 厚度分别为 13.48 mm 和 11.26 mm ,其非线性系数 $\chi = 0.78 \text{ pm/V}$,二倍频失谐角 θ_2 为 $220 \text{ }\mu\text{rad}$,三倍频失谐角 θ_3 为 0 ,三种频率光波吸收系数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为 $0.043/\text{cm}, 0.005/\text{cm}, 0.005/\text{cm}$,考虑吸收、衍射和离散效应忽略三阶及更高阶非线性效应.如图 1(b)所示,基频光束通过前置的一个尺寸为 $414 \text{ mm} \times 414 \text{ mm}$ 的 CPP 以后,再经过频率转换系统后出射的三倍频光束通过楔形聚焦透镜聚焦(焦距 $f = 2.2 \text{ m}$) 在焦平面处得到一个光斑直径 $D = 0.5 \text{ mm}$ 的圆形焦斑.通过数值模拟计算得到三倍频晶体出射处的横截面中心沿 x 方向出射光束的光强分布和焦平面上焦斑的光强分布分别如图 3 和图 4 所示.计算得到三倍频转换效率为 72.631% ,它与后置 CPP 的三倍频转换效率为 77.0585% 相比下降了 4.4275% .可以看出,前置 CPP 使三倍频转换效率有所降低,且对三倍频晶体出射光束顶部光强

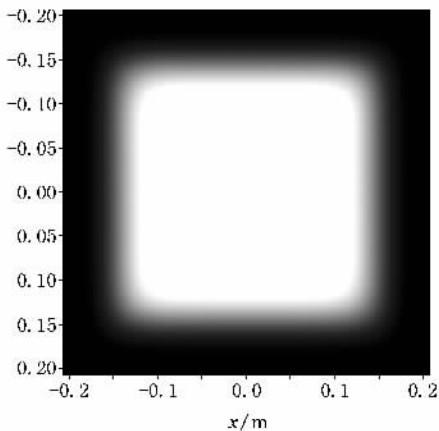


图 2 输入光场强度分布

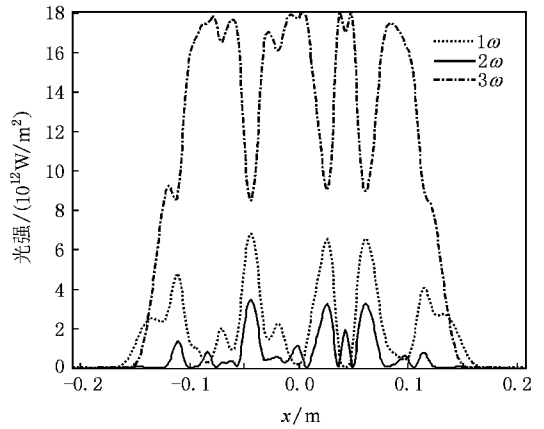


图 3 频率转换系统出射光束横截面中心光场分布

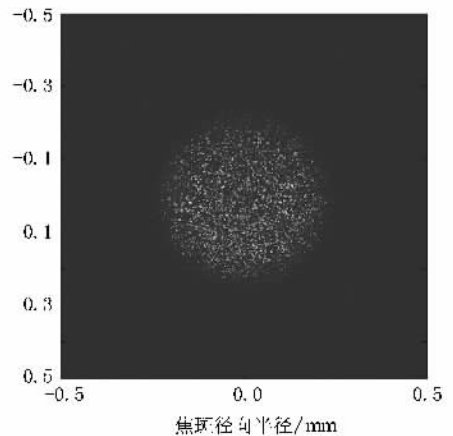


图 4 焦斑光强二维相位分布图

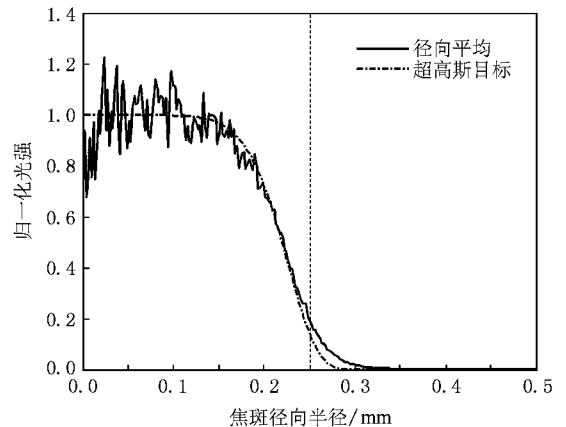


图 5 焦斑径向光强分布图

的均匀性产生了一定影响,导致系统三倍频激光输出的光束通量对比度升高为 0.1754 .图 5 是焦斑径向光强分布图,可见远场光斑在直径 0.5 mm 范围内集中了 95.27% 的能量,这说明焦平面上得到的光

斑能量集中度较好,能量分布也较均匀,与设计方案的要求相符.

3.2. 焦斑大小与系统出射光束特性的关系

在 ICF 终端光学系统中,可通过增加 CPP 相位起伏来加大焦斑直径,但是对于 CPP 前置的方案,相位起伏的加大必然会进一步降低系统三倍频转换效率和出射光束质量.因此,研究焦斑大小与倍频转换效率和出射光束近场的光束通量对比度和远场能量集中度的关系,可确定采用 CPP 前置的条件.在其他条件不变的情况下,通过模拟计算得到了焦斑直径分别为 0.3 mm,0.5 mm,0.7 mm,0.8 mm,1 mm 的 CPP 前置对 3ω 相对转换效率、出射光场光束通量对比度以及远场焦斑能量集中度的关系,分别如图 6、图 7 和图 8 所示.

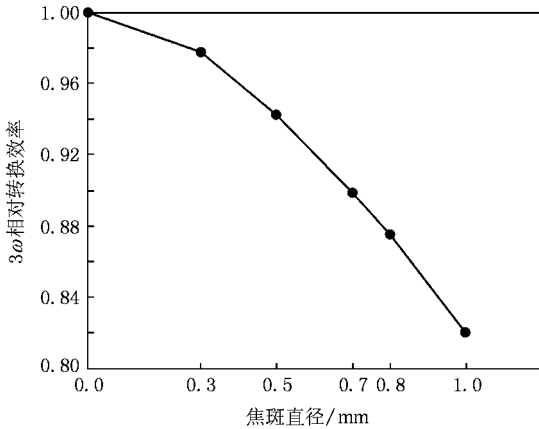


图 6 焦斑直径与三倍频转换效率的关系图

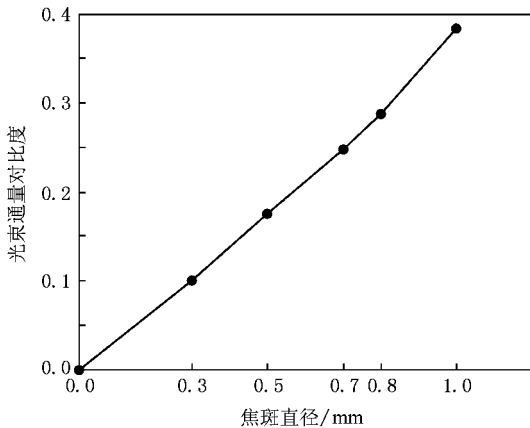


图 7 焦斑直径与光束通量对比度的关系图

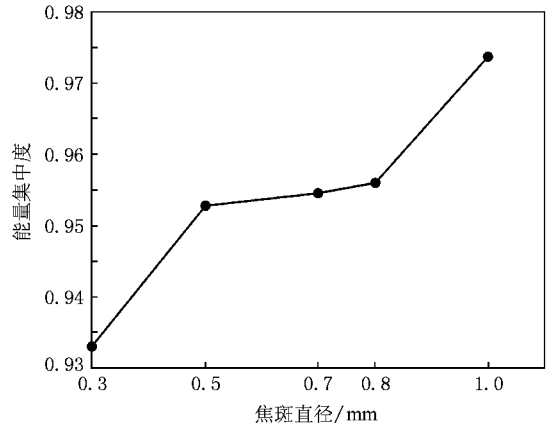


图 8 焦斑直径与焦斑能量集中度的关系图

由此可见,在 CPP 前置的情况下焦斑直径增加的同时,三倍频相对转换效率和光束质量都随之大幅下降,但远场焦斑能量集中度均保持在 95% 以上,焦斑形态以及其均匀性变化不大.在特定的 ICF 系统中,一般认为 3ω 相对转换效率下降控制在 6% 以内,光束通量对比度控制在 0.2 以内,在实验上是可以允许的.由图可知,当设计焦斑尺寸 0.5 mm 时,三倍频转换效率与理想值相比降低了 5.75%,并且出射光束的光束通量对比度已经上升到 0.1754.因此当需要的焦斑尺寸大于 0.5 mm 时,就需要仔细评估是否能够在基频光束中放置 CPP 元件,这时只有通过 ICF 终端光学系统进行优化,才有可能改善光场的各项参数以重新满足设计要求,使 ICF 系统也能够在大焦斑情况下继续正常工作.

4. 结 论

本文采用非线性耦合波方程组并结合微扰理论分析了 CPP 前置对 ICF 三倍频转换效率、出射光束近远场特性的影响.计算模拟结果表明:随着 CPP 远场焦斑的增大,三倍频转换效率和出射光束质量都随之下降,但如果远场焦斑大小控制在 0.5 mm 范围内就能满足 ICF 系统打靶对三倍频转换效率和出射光场光束质量的要求,同时远场焦斑能量集中度也较高.因此,这种情况下前置 CPP 能较好地实现远场焦斑整形匀滑的功能,满足 ICF 驱动器的要求.

- [1] Zhao Y J 1997 *Proc. SPIE* **3047** 54
- [2] Yao X , Gao F H , Wen S L , Zhang Y X , Li J F , Guo Y K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6945 (in Chinese) [姚 欣、高福华、温圣林、张怡霄、李剑峰、郭永康 2007 物理学报 **56** 6945]
- [3] Yao X , Gao F H , Wen S L , Zhang Y X , Li J F , Guo Y K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4891 (in Chinese) [姚 欣、高福华、李剑峰、张怡霄、温圣林、郭永康 2008 物理学报 **57** 4891]
- [4] 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
- [5] 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]
- [6] Williams W H , Auerbach J M , Hensian M A. , Lawson J K , Hunt J T , Sacks R A , Widmayer C C 1998 *Proc. SPIE* **3264** 93
- [7] Eimerl D , Auerbach J M , Milonni P W 1995 *J. Mod. Opt.* **42** 1037
- [8] 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]
- [9] Jerome M A , David E , David M , Peter W M 1995 *Appl. Opt.* **36** 606
- [10] Milonni P W , Auerbach J M , Eimerl D 1995 *Proc. SPIE* **2633** 230

Study on the frontal condition for continuous phase plate in inertial confinement fusion driver *

Yao Xin¹⁾ Gao Fu-Hua^{1)†} Zhang Yi-Xiao¹⁾ Wen Sheng-Lin²⁾ Guo Yong-Kang¹⁾ Lin Xiang-Di¹⁾

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

2 *Chengdu Fine Optical Engineering Research Center , Chengdu 610041 , China)*

(Received 14 October 2008 ; revised manuscript received 21 October 2008)

Abstract

Optimal placement for continuous phase plate (CPP) in terminal optical system of the Inertial Confinement Fusion (ICF) driver has been studied. Based on non-linear perturbation and transmitting theory of high power laser , the optical characteristics in near and far fields as well as third harmonic conversion efficiency after passing through the frequency conversion system has been calculated. As a result , the third harmonic conversion efficiency and optical characteristics of the emergent light beam are influenced by the CPP which is placed before the frequency conversion system. But if the diameter of the round focal spot in far field is smaller than 0.5 mm , the decline of the third harmonic conversion efficiency and the rise of contrast ratio are within permitted range , the shape of focal spot in far field and the encircled energy of focal spot also accord with the design requirement at the same time. The CPP which enables small focal spot in far field , when located in the beam path of fundamental frequency of ICF system to smooth and shape the light beam , will not exert influence on the normal running of ICF system.

Keywords : continuous phase plate , beam smoothing element , inertial confinement fusion , contrast ratio

PACC : 4225 , 4260 , 4265K

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

† Corresponding author. E-mail : gaofuhua@seu.edu.cn