

惯性约束聚变驱动器连续相位板前置时 频率转换晶体内部光场研究*

占江徽 姚欣[†] 高福华 阳泽健 张怡霄 郭永康

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

(2009年10月20日收到; 2010年3月29日收到修改稿)

本文针对惯性约束聚变驱动器终端光学系统中连续相位板置于基频光路(前置)时, 频率转换晶体内部光场分布进行了研究. 经研究发现连续相位板前置对基频光的相位调制降低了频率转换效率, 增大了频率转换晶体内部光场的不均匀性, 它导致晶体激光诱导损伤风险的可能性加大. 值得注意的是: 在频率转换晶体入射和出射端面附近激光调制度和最大光强相对于其他区域高, 发生激光诱导损伤的可能性相对更大. 因此当不断增大频率转换系统输入的基频光光强时, 为保证惯性约束聚变终端光学系统的正常运行需要把连续相位板前置对频率转换晶体内部光场分布的影响控制在容许范围之内.

关键词: 惯性约束聚变, 连续相位板, 频率转换晶体, 激光诱导损伤

PACS: 42.25.Fx, 42.65.-k, 42.30.Kq, 03.50.De

1. 引言

惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)打靶实验需要将钕玻璃激光器输出的波长为 1.053 μm 的基频光转换成波长为 0.351 μm 的打靶光束, 而需要进行频率转换的激光束具有非常高的能量和峰值功率^[1-3], 在实验过程中激光束通过频率转换系统时极易造成 KDP 频率转换晶体出现激光诱导损伤而不能继续使用^[4,5], 因此如何降低强激光对频率转换晶体的损伤对于保证系统安全运行有重要的意义. 频率转换晶体激光诱导损伤是一个非常复杂的问题, 涉及晶体的材料性质、内部缺陷、表面状况、外部环境等诸多因素^[6]. 但是, 晶体激光诱导损伤的概率与其内部光场强度的分布有着最为直接的联系. 光强越大损伤的可能性越大, 光强越小损伤的可能性也越小.

连续相位板(continuous phase plate, CPP)是惯性约束聚变终端光学系统中常用的光束整形匀滑器件^[7]. 已知靶面聚焦光斑特性不仅与 CPP 的结构有关还与 CPP 的排布位置与使用状态有关. CPP 可以置于基频光路, 二倍频光路, 三倍频光路中, NIF

采用将 CPP 置于基频光路中的方案^[8]. 我们经过研究认为 CPP 置于基频光路中时其晶片可采用 K9 玻璃, 而不必采用价格昂贵的石英玻璃, 从而大幅降低制作成本而且 CPP 置于基频光路中可减少 3ω 光路中的反射面, 从而减少其产生的杂散光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^[9]. 但 CPP 的微浮雕结构必将对入射的基频光产生调制, 使得频率转换过程中产生的光束受到调制在某些区域形成光强显著增强, 从而造成这些区域强激光损伤的概率增大.

国内外对激光诱导损伤的研究已有较多报道, 但对于 CPP 置于基频光路时, 频率转换晶体内部激光诱导损伤问题还未见报道. 因此深入研究 CPP 置于基频光路时, 对频率转换晶体内部光场调制特性的影响, 获得晶体内最大光强的位置分布, 对于提高 CPP 前置方案的有效性, 降低频率转换晶体强激光损伤风险, 提高其使用寿命, 减小系统运行成本, 具有十分重要的意义.

本文利用衍射公式、非线性频率转换耦合波方程组和微扰理论, 模拟了 ICF 终端光学系统中激光传输过程, 主要分析了 CPP 置于基频光路对频率转换晶体内部光场分布的影响. 通过研究得出 CPP

* 国家高技术研究发展计划(批准号:804)项目资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lianshucn@163.com

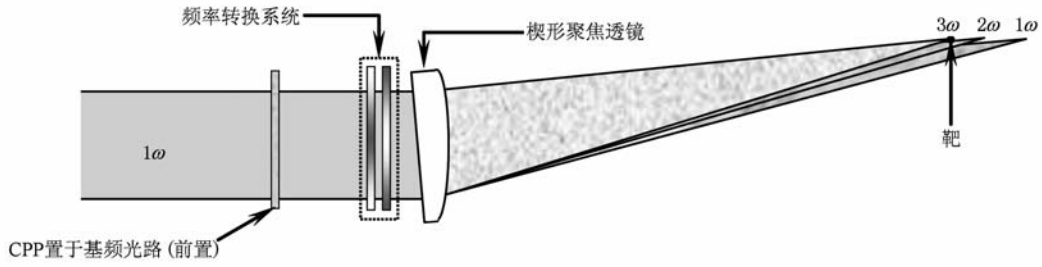


图1 ICF 终端光学系统原理示意图

前置降低了三种谐波光场强度分布的均匀性,增大了频率转换晶体内部特别是端面附近激光诱导损伤风险的结论,为以后进一步避免 CPP 前置引起的频率转换晶体激光诱导损伤提供参考依据.

2. 物理模型

如图 2 所示,钼玻璃激光器输出的基频光经

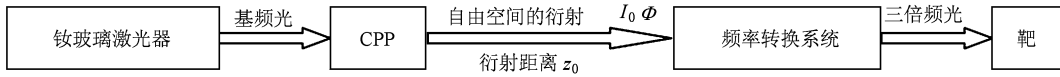


图2 CPP 前置时终端光学系统等效光路图

本文在考虑了三波混频、近轴衍射、横向空间离散效应以及晶体吸收等因素后得到采用 I / II 类角度失谐方案的耦合波方程组^[10-13],其中对于 I 类匹配二倍频耦合波方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{1o}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_1} \nabla^2 E_{1o} + \frac{i\omega}{2n_{1o}c} \bar{\chi}_1 E_{2e} E_{1o}^* e^{i\Delta kz} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha_1 E_{1o}, \\ \frac{\partial E_{2e}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_2} \nabla^2 E_{2e} - \rho_2 \frac{\partial E_{2e}}{\partial y} + \frac{i\omega}{2n_{2e}c} \bar{\chi}_1 E_{1o}^2 e^{-i\Delta kz} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha_2 E_{2e}. \end{aligned} \quad (1)$$

对于 II 类匹配三倍频耦合波方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{1e}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_1} \nabla^2 E_{1e} - \rho_1 \frac{\partial E_{1e}}{\partial y} \\ &\quad + \frac{i\omega}{2n_{1e}c} \bar{\chi}_2 E_{3e} E_{2o}^* e^{i\Delta kz} - \frac{1}{2} \alpha_1 E_{1e}, \\ \frac{\partial E_{2o}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_2} \nabla^2 E_{2o} + \frac{i2\omega}{2n_{2o}c} \bar{\chi}_2 E_{3e} E_{1e}^* e^{i\Delta kz} \\ &\quad - \frac{1}{2} \alpha_2 E_{2o}, \end{aligned}$$

过 CPP 在自由空间衍射传输 z_0 后到达频率转换系统. 其中 CPP 对基频光的调制可以被看成附加于光束上的相位微扰,将在频率转换过程中引入一个附加的相位失谐量的空间分布 $\Delta k_a(x, y)$, 从而影响三倍频转换效率,造成新生成的二、三次谐波近场强度分布的不均匀性. 正是这种不均匀性增加了频率转换晶体激光诱导损伤的风险.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{3e}}{\partial z} &= \frac{i}{2k_3} \nabla^2 E_{3e} - \rho_3 \frac{\partial E_{3e}}{\partial y} \\ &\quad + \frac{i3\omega}{2n_{3e}c} \bar{\chi}_2 E_{1e} E_{2o} e^{i\Delta kz} - \frac{1}{2} \alpha_3 E_{3e}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 E_{io} 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, θ 是光传播方向 z 与光轴的夹角, $\bar{\chi}_1$ 和 $\bar{\chi}_2$ 分别是二、三倍频过程的有效非线性系数, α_i 是吸收系数, Δk 是相位失谐量, n_i 为折射率. 频率转换过程的初始条件为: $E_{1o} = \sqrt{2I_0/\epsilon_0 c n_{1o}} \exp(i\Phi)$, $E_{2e} = 0$, 式中 I_0 和 Φ 分别为基频光经过 CPP 并通过衍射传输后进入频率转换系统时的光强和初始相位, ϵ_0 为真空中介电常数.

为了定量分析晶体内部光束宏观分布的均匀性,引入光强调制度,其定义如下:光强调制度 M (modulation ratio) 为

$$M = \frac{I_{\max}}{I_{\text{avg}}}, \quad (3)$$

式中 I_{\max} 为最大光强, I_{avg} 为平均光强. 光强调制度可以准确的反映光束近场峰值强度的大小,可以用于

判断系统运行安全性.

3. CPP 置于基频光路方案频率转换晶体内部光场分布的数值计算结果及分析

采用前述方法,对 ICF 系统 CPP 置于基频光路时频率转换晶体内部光场分布进行了模拟分析,计算参数如下:钕玻璃激光器输出光强为 2.5 GW/cm^2 ,激光脉冲宽度 3 ns ,光束直径为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的 8 阶理想超高斯光束(图 3).基频光波长为 $\lambda_{1\omega} = 1.053 \text{ }\mu\text{m}$,频率转换系统的二倍频、三倍频晶体 KDP 厚度分别为 $h_2 = 13 \text{ mm}$ 和 $h_3 = 11 \text{ mm}$,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 $0.043/\text{cm}, 0.005/\text{cm}, 0.005/\text{cm}$. 根据 NIF 终端光学系统光路结构^[14],上述基频 8 阶超高斯光束通过一个尺寸为 $430 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ 的 CPP(图 4)衍射传输 $z_0 = 44 \text{ cm}$ 以后,再经过频率转换系统,在楔形聚焦透镜(焦距 $f = 5.6 \text{ m}$)聚焦的靶点处形成一个光斑直径 $D = 0.75 \text{ mm}$ 的圆形焦斑.考虑吸收、衍射和离散效应忽略三阶及更高阶非线性效应情况下,得到频率转换晶体内部纵向各面的调制度和最大光强值分别如图 5 和图 6 所示.

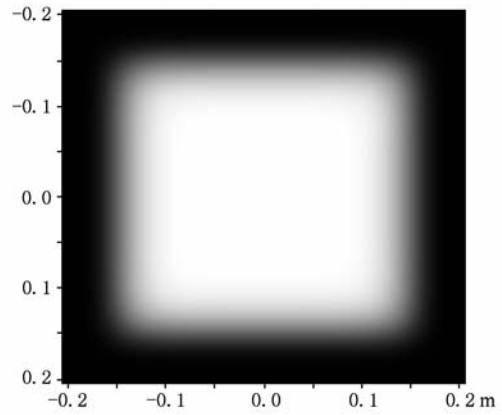


图 3 输入光场强度分布(基频光)

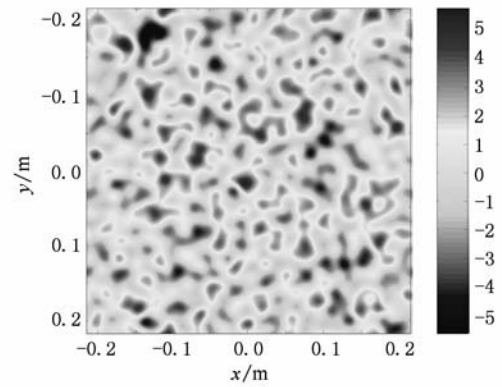


图 4 CPP 相位分布

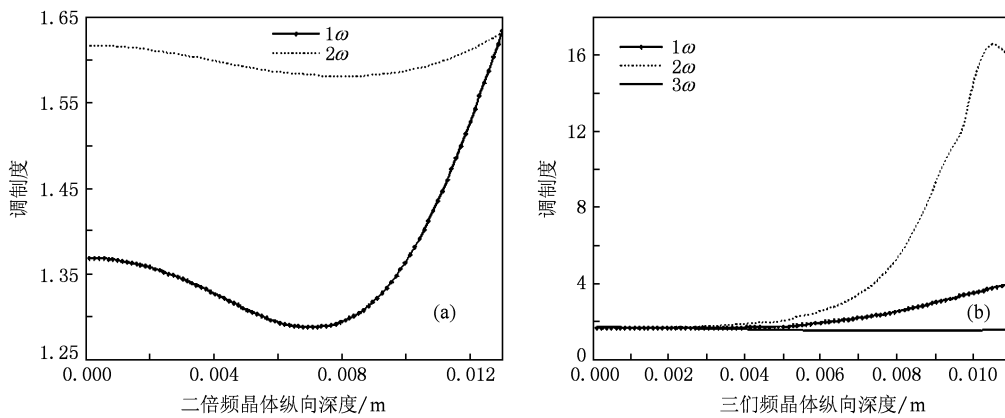


图 5 频率转换晶体内部光强调制度分布 (a)二倍频晶体;(b)三倍频晶体

由图 5 并结合表 2 可知,在二倍频晶体内部,基频光与二倍频光在晶体出射面处调制度达到最大且在三倍频晶体内部继续被放大,这主要是由于 CPP 前置造成的基频光相位扰动在通过频率转换晶体过程中(由于衍射和非线性作用)逐步被放大从

而影响光场强度分布的均匀性,造成越来越严重的调制.由图 6 和表 1 可知, CPP 前置降低了三倍频转换效率,却增大了频率转换晶体内部纵向各处三种谐波的最大光强,且三倍频晶体内部基频光和二倍频光不均匀性较三倍频光更大.其原因是基频光被

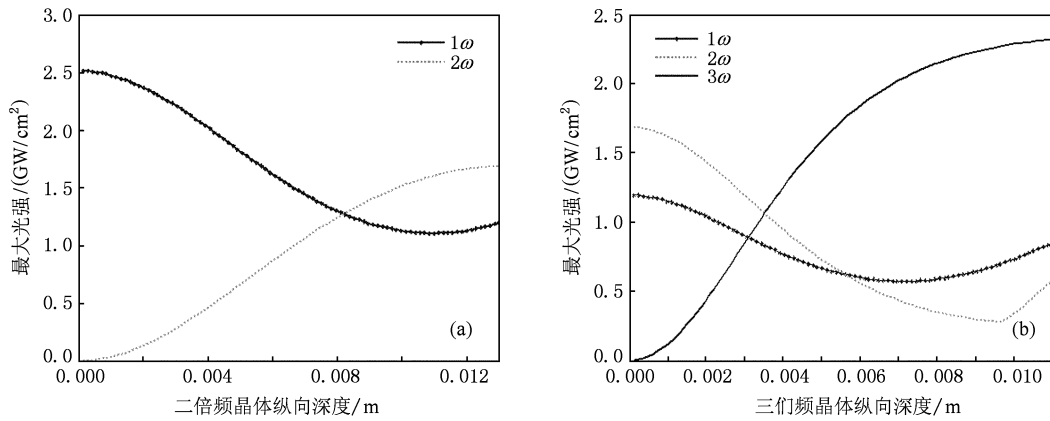


图6 倍频晶体内部最大光强分布 (a)二倍频晶体;(b)三倍频晶体

附加了相位扰动导致光场分布不均匀使得频率转换晶体内部纵向各处的最大光强都要比 CPP 置于三倍频光路时高,同时三倍频转换效率也下降了 2.7234%。晶体对激光的抗损伤能力与波长有关,按照本系统频率转换 KDP 晶体的激光诱导损伤阈值标准 8 J/cm^2 (351 nm), 10 J/cm^2 (527 nm), 15 J/cm^2 (1053 nm), 分别计算得到容许的最大光强值分别为 2.66 GW/cm^2 (351 nm), 3.33 GW/cm^2 (527 nm) 和 5 GW/cm^2 (1053 nm); 根据表 3 的计算结果可以看出:采用 CPP 前置方案,在频率转换晶体内部三种频率的激光最大光强均没有超过容许范围。但 CPP 前置时三倍频晶体出射处的最大光强为 2.3223 GW/cm^2 已经接近 KDP 晶体三倍频光激光

诱导损伤阈值标准。另外结合表 2 和表 3 调制度和最大光强分布的纵向位置并考虑由于晶体表面加工缺陷等因素影响,发现在频率转换晶体入射和出射面附近发生激光诱导损伤的可能性更大。因此如果不断增大频率转换系统输入的基频光光强那就需要仔细评估是否能够在频率转换系统之前放置 CPP 了。

表1 CPP 置于基频光路和三倍频光路晶体内部光学参数比较

CPP 位置及状态	二倍频转换效率/%	三倍频转换效率/%
基频光路	55.5663	79.8130
三倍频光路	55.6875	82.5364

表2 CPP 前置时整个频率转换晶体内部光场最大调制度及其位置

晶体类型	晶体纵向深度位置/mm			最大调制度		
二倍频晶体 KDP (13 mm)	13.0(1ω)	13.0(2ω)		1.6338(1ω)	1.6333(2ω)	
三倍频晶体 KDP (11 mm)	11.0(1ω)	10.5111(2ω)	0.1222(3ω)	3.9525(1ω)	16.5394(2ω)	1.6887(3ω)

表3 CPP 前置时整个频率转换晶体内部最大光强及其位置

晶体类型	晶体纵向深度位置/mm			最大光强/(GW/cm²)		
二倍频晶体 KDP (13 mm)	0.1444(1ω)	12.8556(2ω)		2.5153(1ω)	1.6889(2ω)	
三倍频晶体 KDP (11 mm)	0.1222(1ω)	0.1222(2ω)	11.0(3ω)	1.1952(1ω)	1.6878(2ω)	2.3223(3ω)

4. 结 论

本文针对 ICF 驱动器终端光学系统中束匀滑器件 CPP 置于基频光路的方案,利用衍射公式、非线性耦合波方程组和相位微扰理论计算了 CPP 置于基频光路时频率转换晶体内部的光场分布。通过与

CPP 后置进行比较得出:CPP 前置于基频光路增大了晶体内部光场调制度即降低了光场分布的均匀性从而导致三倍频转换效率相对下降;增大了三种谐波在晶体内部的光强最大值和激光诱导损伤几率,尤其是在频率转换晶体端面附近激光诱导损伤发生可能性更大。虽然此次计算得到晶体内部各处最大光强均在激光损伤阈值以下,频率转换晶体发

生激光诱导损伤的可能性较小,但如果需要进一步提高频率转换系统输入的光强,就需要特别注意频率转换晶体的激光诱导损伤问题.在此情况下为了继续保证 CPP 置于基频光路方案的有效性,降低晶

体的激光诱导损伤风险和光强调制度可以采用一系列优化方案以降低由 CPP 对基频光的调制引起的对系统的不利影响,保持 ICF 终端光学系统的稳定高效运行.

- [1] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach, J M, Bowers M W, Dixit S N, Erbert G V 2007 *Appl. Opt.* **46** 3276
- [2] Haynam C A, Sacks R A, Wegner P J, Bowers M W, Dixit S N 2008 *J. Phys. :Conf. Ser.* **112** 032004
- [3] Michel L A 1997 *SPIE* **3047** 38
- [4] Han J H, Feng G Y, Yang L M, Zhang Q H, Xie X D, Zhu Q H, Zhou S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5558 (in Chinese) [韩敬华、冯国英、杨李茗、张秋慧、谢旭东、朱启华、周寿桓 2008 物理学报 **57** 5558]
- [5] 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]
- [6] Wang K P, Fang C S, Zhang J X, Wang S L, Sun X, Gu Q T, Li Y P 2004 *Journal of Synthetic crystals* **33** 48 (in Chinese) [王坤鹏、房昌水、张建秀、王圣来、孙洵、顾庆天、李义平 2004 人工晶体学报 **33** 48]
- [7] John A M 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 74
- [8] 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
- [9] Yao X, Gao F H, Gao B, 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、高博、张怡霄、温圣林、郭永康、林祥棣 2009 物理学报 **58** 3130]
- [10] 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]
- [11] 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
- [12] Eimerl D, Auerbach J M, Milonni P W 1995 *J. Mod. Opt.* **42** 1037
- [13] 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]
- [14] Adams C 1996 *UCRL-ID-126987-Rev. B* **187** 11

Study on intensity distribution inside the frequency conversion crystals for continuous phase plate front-located in inertial confinement fusion driver^{*}

Zhan Jiang-Hui Yao Xin[†] Gao Fu-Hua Yang Ze-Jian Zhang Yi-Xiao Guo Yong-Kang
(College of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(Received 20 October 2009; revised manuscript received 29 March 2010)

Abstract

This paper studies the intensity distribution inside the frequency conversion crystals when the continuous phase plate (CPP) is placed in 1ω light of final optics assembly for inertial confinement fusion (ICF) driver. Our study shows that the modulation of 1ω light caused by CPP makes the frequency conversion efficiency and the uniformity of intensity field inside the frequency conversion crystals decrease. It leads to the possibility of laser induced damage for frequency conversion crystals to increase. What worth paying special attention to is: the modulation and maximum intensity in the vicinity of entrance and exit surface of frequency conversion crystal is much higher than in other areas, so the possibility of laser induced damage is also relatively greater there. However, if the intensity of 1ω light before the frequency conversion system becomes even greater, for the normal running of final optics assembly the modulation and maximum intensity inside the frequency conversion crystals should be confined within the permitted range.

Keywords: inertial confinement fusion, continuous phase plate, frequency conversion crystal, laser induced damage

PACS: 42.25.Fx, 42.65.-k, 42.30.Kq, 03.50.De

^{*} Project supported by the "863" Program of China (Grant No. 804).

[†] Corresponding author. E-mail: lianshuen@163.com