

文章编号: 0258-7025(2009)02-0318-06

# 神光 III 原型装置中连续相位板的应用位置分析

李平 贾怀庭 王芳 刘兰琴 粟敬钦

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 用改进的盖斯贝格-撒克斯通(G-S)算法对满足加工能力的连续相位板(CPP)进行了设计,并从对焦斑的整形能力、三倍频转换效率、近场强度调制等方面详细分析了基频光 CPP 和三倍频光 CPP 的性能优越差异,结果显示,基频光 CPP 可以满足焦斑的形态要求;在采用三倍频晶体(KDP)“ $I + II$ ”倍频方式下,失谐角越大,转换效率受影响越大,且影响程度受目标焦斑大小的限制;对三倍频转换效率影响越大,三倍频光近场调制越大。计算结果对神光 III 原型装置的 CPP 应用具有一定的指导意义。

**关键词** 光学器件; 连续相位板; 三倍频转换效率; 光束质量; 焦斑整形

中图分类号 TN241 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0318

## Analysis of Continuous Phase Plates Applying Position for TIL Facility

Li Ping Jia Huaiting Wang Fang Liu Lanqin Su Jingqin

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** With the designed continuous phase plates (CPP) by improved G-S algorithm, the focal spot shaping ability,  $3\omega$  conversion efficiency and near field intensity modulation for two kinds of CPP were analyzed. It included that  $1\omega$  CPP can meet focal spot shaping requirement compared to  $3\omega$  CPP. With the KDP crystals by “ $I + II$ ” styles,  $3\omega$  conversion efficiency is impacted larger when the disarrange angle being larger, and the degree is related with focal spot size; the more  $3\omega$  conversion efficiency impacted, the stronger near field intensity modulation will be. The result can instruct CPP application for TIL facility.

**Key words** optical devices; continuous phase plates;  $3\omega$  conversion efficiency; beam quality; focal spot shaping

## 1 引言

在惯性约束聚变(ICF)研究中,聚焦光斑形态能否达到物理实验的要求将直接关系到实验的成败<sup>[1,2]</sup>。目前,焦斑形态中轮廓主要通过近场相位元件来控制,其主要包含随机相位板(RPP)<sup>[3]</sup>,透镜阵列<sup>[4,5]</sup>,相息相位板(KPP)<sup>[6]</sup>,分布相位板(DPP)<sup>[7]</sup>和连续相位板(CPP)<sup>[8~10]</sup>。RPP 在 1984 年由日本大阪大学 Y. Kato 提出,它具有双台阶结构,但其有能量利用率低、焦斑形态不易控制的缺点。此后,1993 年美国利弗莫尔实验室(LLNL)为克服 RPP 的局限性,提出了 KPP 概念,它具有多台阶结构,台阶深度为  $2\pi$ ,用离散相位来近似连续相位;DPP 在 KPP 基础上进行了改进,它不限制台阶深度从而克服了 KPP 上的  $2\pi$  跳变。但以上三种相位板具有台阶结

构,会引起近场的强度调制,因而只能用在光路末端,即使如此,试验中仍然发现相位板的后表面以及其后的屏蔽片仍然出现了大量的损伤<sup>[11]</sup>。连续相位板(CPP)具有能量利用率高、焦斑形态易于控制等优点,因而受到极大的关注。用盖斯贝格-撒克斯通(G-S)算法进行优化设计,可得到能量利用率高达 98% 的理想结果。它可避免台阶式结构带来的散射以及强度调制,因此为应用到基频光段提供了潜力,从而可大大降低元件的损伤,提高元件的使用寿命。

本文采用改进的盖斯贝格-撒克斯通算法对满足加工能力的 CPP 进行了设计。并从 CPP 对光路功能的影响进行了详细分析,主要包含对三倍频效率的影响,对光学元件是否造成损伤等,获得了 CPP 应用于不同位置时对光路的影响规律,并由此

收稿日期: 2008-08-29; 收到修改稿日期: 2008-10-28

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2007B08005)资助课题。

作者简介: 李平(1984—),男,硕士,主要从事高功率固体激光传输研究。E-mail: liping1984@tsinghua.org.cn

指出 CPP 应用于神光Ⅲ原型装置基频光的可能性。计算结果对我国高功率固体激光装置的 CPP 应用具有一定的指导意义。

## 2 基频光 CPP 应用的理论分析

### 2.1 应用意义

如图 1 所示,在神光Ⅲ原型装置中,有 CPP 置于基频光端( $1\omega$  CPP)和三倍频光端( $3\omega$  CPP)的两种方案。基频光端 CPP 之后的光学元件有三倍频晶体(KDP)、取样光栅(BSG)、楔形透镜(WFL)和

屏蔽片(DS)。CPP 引入位置的不同会对光学元件有不同的影响,其差异是  $1\omega$  CPP 引入的相位会对三倍频产生影响,这种影响主要体现在三倍频效率的下降和后续光路的强度调制,这对激光装置的效率和光学元件的维护很不利,但  $1\omega$  CPP 有着不可比拟的优势:如损伤阈值高、材料选择广等。表 1 对两种方案的优缺点进行了详细比较。因此,需要对  $1\omega$  CPP 对光路带来的影响规律进行详细研究,从而确定  $1\omega$  CPP 的使用条件。

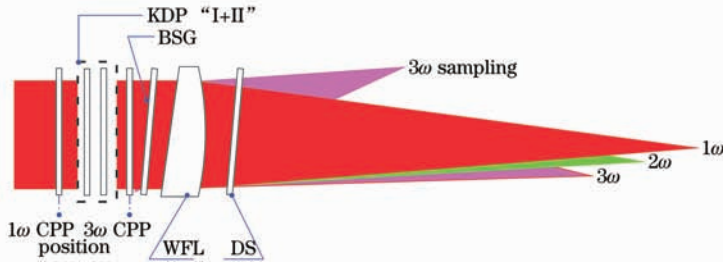


图 1 CPP 在终端光路位置示意图

Fig. 1 Schematic of the optical configuration of the final optics assembly

表 1 CPP 应用位置的比较

Table 1 Comparison of CPP applying position

CPP applying position	Advantage	Disadvantage
$1\omega$	High damage threshold, variously optional material	Affecting $3\omega$ conversion efficiency and beam quality
$3\omega$	Affecting a little to optical path	The strict condition for material selected

### 2.2 理论分析模型

基频光和三倍频光 CPP 的主要差异是两者在光传输过程中,基频光 CPP 要经过一次三倍频的转换过程。采用 KDP 晶体“ I + II ”模式来实现谐波转换,设光场的表达式为

$$E_j(x, y, z, t) = \frac{1}{2} A_j(x, y, z, t) \exp[-i(\omega_j t - k_j z)] + c. c., \quad j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

相应的耦合波方程为, I 类匹配的倍频稳态耦合波方程组为<sup>[12,13]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} A_1 &= -\frac{i}{2k_1} \nabla_{\perp}^2 A_1 - \frac{1}{2} \alpha_1 A_1 + \frac{i\omega_1 \chi_{\text{eff}}}{n_o(\omega) c} A_2 A_1^* \exp(-i\Delta k z) + \\ & i\epsilon_0 n_o(\omega) \omega_1 \left[ \frac{\gamma_{11}}{2} |A_1|^2 + \gamma_{12} |A_2|^2 \right] A_1, \\ \frac{\partial}{\partial z} A_2 &= -\frac{i}{2k_2} \nabla_{\perp}^2 A_2 - \rho_{2\omega} \frac{\partial A_2}{\partial r_e} - \frac{1}{2} \alpha_2 A_2 + \frac{i\omega_2 \chi_{\text{eff}}}{2n_e(2\omega, \theta) c} A_1^2 \exp(i\Delta k z) + \\ & i\epsilon_0 n_e(2\omega, \theta) \omega_1 \left[ \frac{\gamma_{22}}{2} |A_2|^2 + \gamma_{21} |A_1|^2 \right] A_2, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $k_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 为波矢, 定义为  $k_j = n_j \omega_j / c$ ,  $c$  为真空中光速,  $n_j$  和  $\omega_j$  分别为晶体折射率和光频率,  $\alpha$  为晶体中的线性吸收系数,  $\chi_{\text{eff}}$  为晶体的有效非线性折射率系数,  $\gamma_{ij}$  则为非线性折射率系数。  $\Delta k = 2k_1 - k_2$  为基频光和倍频光的波矢失配量。

II 类三倍频的耦合波方程组为

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial z} A_1 &= -\frac{i}{2k_1} \nabla_{\perp}^2 A_1 - \rho_1 \frac{\partial A_1}{\partial r_e} - \frac{1}{2} \alpha_1 A_1 + \frac{i\omega_1 \chi_{\text{eff}}}{n_e(\omega, \theta) c} A_3 A_2^* \exp(-i\Delta k z) + \\
&\quad i\epsilon_0 n_e(\omega, \theta) \omega_1 \left[ \frac{\gamma_{11}}{2} |A_1|^2 + \gamma_{12} |A_2|^2 + \gamma_{13} |A_3|^2 \right] A_1, \\
\frac{\partial}{\partial z} A_2 &= -\frac{i}{2k_2} \nabla_{\perp}^2 A_2 - \frac{1}{2} \alpha_2 A_2 + \frac{i\omega_2 \chi_{\text{eff}}}{2n_o(2\omega) c} A_3 A_1^* \exp(i\Delta k z) + \\
&\quad i\epsilon_0 n_o(2\omega) \omega_2 \left[ \frac{\gamma_{22}}{2} |A_2|^2 + \gamma_{23} |A_3|^2 + \gamma_{21} |A_1|^2 \right] A_2, \\
\frac{\partial}{\partial z} A_3 &= -\frac{i}{2k_3} \nabla_{\perp}^2 A_3 - \rho_3 \frac{\partial A_3}{\partial r_e} - \frac{1}{2} \alpha_3 A_3 + \frac{i\omega_3 \chi_{\text{eff}}}{2n_e(3\omega, \theta) c} A_1 A_2 \exp(i\Delta k z) + \\
&\quad i\epsilon_0 n_e(3\omega, \theta) \omega_3 \left[ \frac{\gamma_{33}}{2} |A_3|^2 + \gamma_{31} |A_1|^2 + \gamma_{32} |A_2|^2 \right] A_3,
\end{aligned} \tag{3}$$

其参量定义与倍频过程类似,只是相位失配因子定义为  $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$ 。式中  $E_i, n_i, v_i$  和  $\alpha_i$  分别为对应频率  $\omega_i$  处的复振幅、折射率、群速度和吸收系数(在混频过程中,下标  $j=1,2,3$  分别表示基频光、倍频光和三倍频光;在倍频过程中  $j=1,2$  均表示基频入射光,  $j=3$  表示倍频光);  $d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数;  $\Delta k_0$  为相位失配量。本文将利用该模型对  $1\omega$  CPP 对三倍频转换过程中进行计算。

### 3 数值模拟

#### 3.1 G-S 算法设计 CPP 的结果

利用波前畸变的低频模型<sup>[14]</sup>,设计了一种无序的连续初始相位分布。其基本方法是滤去随机相位的高频成分

$$\Phi_m(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}}) = a \mathcal{R} \{ \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [\xi(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}})] \} \times \exp[-(\ln 2)(k_{\text{nf}}/k_0)^{20}] \}, \tag{4}$$

$\Phi$  表示初始相位,下标 nf 表示近场,  $\xi(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}})$  为随机相位分布,取值范围为  $[-1, 1]$ ;  $k_{\text{nf}}$  为波矢大小,  $k_0$  为截止频率;  $\mathcal{F}$  为傅里叶算符,  $\mathcal{R}$  为实数算符,  $a$  为

控制近场相位的波谷波峰 (PV) 值,它可以控制初始远场能量分布大小。表 2 为设计 CPP 的光束基本参数,图 2 为该方法设计 CPP 的一个实际例子:分别为设计的 CPP 面形和对应的远场光强分布,其中目标焦斑直径  $750 \mu\text{m}$ ,可见在要求的 CPP 面形条件下,可设计出所需的远场光强分布,由此可对 CPP 应用条件进行详细分析。以下 CPP 对光路的影响规律都基于此方法的 CPP 设计,其中 CPP 面形控制的最小加工单元控制为  $15 \text{ mm}$ (反映为 CPP 面形控制的截止频率)。

表 2 设计 CPP 的光束基本参数

Table 2 Basic parameters for CPP designing

Beam aperture / mm	290
Calculated aperture / mm	580
Focal length / m	2.2
Cutoff frequency of CPP / $\text{mm}^{-1}$	1/15
Wavelength / $\mu\text{m}$	0.351

需要说明的是,因三倍频后光场相位大约为三倍频前的 3 倍,所以  $1\omega$  CPP 的面形设计是按照此规律对设计出的  $3\omega$  CPP 面形进行处理的。

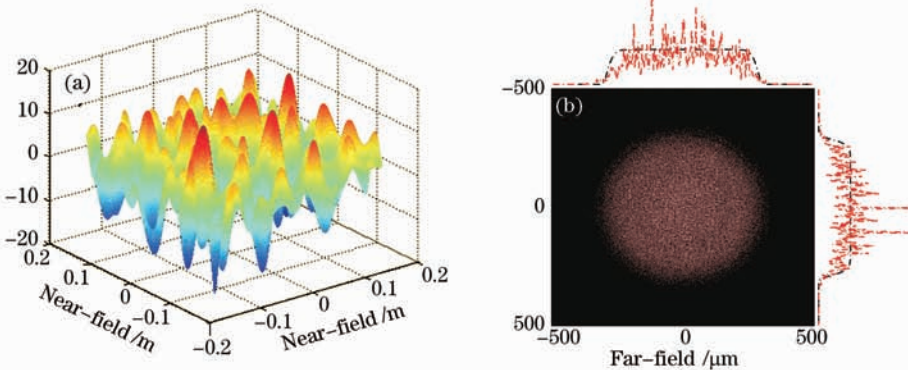


图 2 G-S 算法设计。(a) CPP 面形分布, (b) 远场光强分布

Fig. 2 (a) Surface of designed CPP and (b) far-field images by random phase filtered as initial phase

### 3.2 基频光 CPP 对三倍频转换效率的影响

图 3 模拟了在 KDP 晶体 I + II 模式下  $1\omega$  CPP 对三倍频转换效率的影响。其中晶体厚度为 11 mm 和 9 mm, CPP 对焦斑整形目标为  $500\ \mu\text{m}$  直径的圆,图 3(a)是在倍频晶体不同失谐角下,引入  $1\omega$  CPP 前后的效率曲线,图 3(b)为在  $200\ \mu\text{rad}$  失谐角下, CPP 以两个不同方向面对 KDP 时的效率曲线。由图可见,  $1\omega$  CPP 对  $3\omega$  转换效率的影响随倍

频晶体失谐角的增大而增大,无失谐角时,  $1\omega$  CPP 几乎不影响三倍频效率;  $1\omega$  CPP 放置方向也不影响三倍频转换效率。考虑神光Ⅲ原型装置基频光功率密度为  $2.5\ \text{GW}/\text{cm}^2$ , 这时仍然是失谐角为  $200\ \mu\text{rad}$  时效率最高,在采用  $1\omega$  CPP 的情况下,对应  $500\ \mu\text{m}$  直径的目标焦斑,三倍频效率大约下降了 3.5%,影响并不明显。

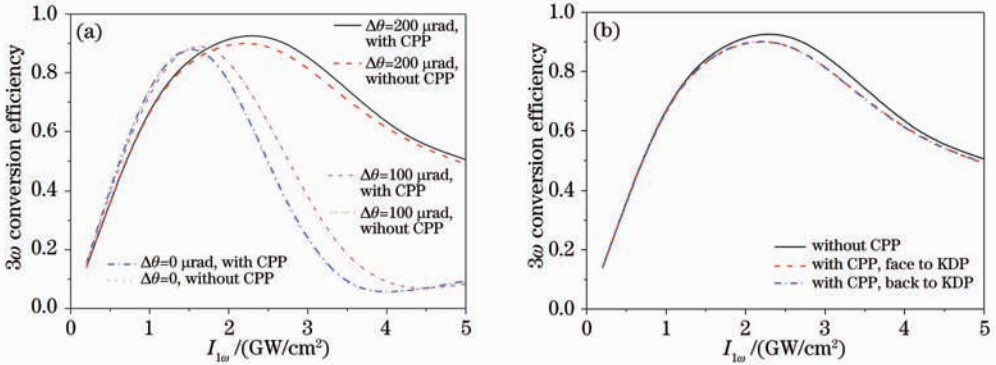


图 3  $1\omega$  CPP 对三倍频效率曲线的影响。(a)不同失谐角下引入  $1\omega$  CPP 的三倍频效率曲线; (b)  $1\omega$  CPP 不同放置方向的三倍频效率曲线

Fig. 3 Impact of  $3\omega$  efficiency curve with  $1\omega$  CPP. (a)  $3\omega$  efficiency curve with  $1\omega$  CPP by different detuned angle; (b)  $3\omega$  efficiency curve with  $1\omega$  CPP by different direction

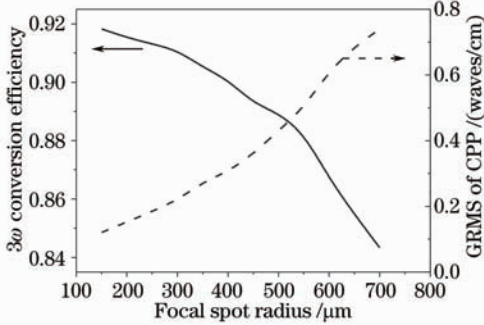


图 4 不同整形目标时  $1\omega$  CPP 的 GRMS 值及其对三倍频效率的影响

Fig. 4  $3\omega$  efficiency and GRMS of CPP varied by focal spot size

另一方面,不同整形目标的  $1\omega$  CPP 对三倍频转换效率影响不同。研究表明,焦斑能量发散程度和光束相位的 GRMS 值紧密相关。因此不同的焦斑大小, CPP 面形的基本特征如 GRMS 值将不同。而相位畸变的 GRMS 值又严重影响着晶体的倍频效率。图 4 模拟了在基频光功率密度为  $2.5\ \text{GW}/\text{cm}^2$ , 倍频晶体失谐角  $200\ \mu\text{rad}$  时,不同焦斑大小下, CPP 的 GRMS 值和三倍频转换效率随焦斑大小的变化曲线,由图可见,目标焦斑越大, CPP 的 GRMS 值越大,对三倍频转换效率影响也越大。进一步研

究发现转换效率的下降和目标焦斑的增大并不是线性关系,而是目标焦斑越大,对三倍频效率的影响更为敏感,这主要是因为 CPP 还需要对焦斑包络内的能量分布进行有效的控制,目标焦斑越大,焦斑内能量分布越难控制,这需要 CPP 的 GRMS 值更高(相比一般规律的发散角大小和近场 GRMS 值的线性关系)。因此  $1\omega$  CPP 的应用应与其所整形的目标联系起来,当其对三倍频的影响超越了所能容忍的目标时,就必须采用  $3\omega$  CPP。

### 3.3 基频光 CPP 对近场调制的影响

图 5 分别从功率密度和 CPP 对焦斑整形目标大小两方面分析了采用  $1\omega$  CPP 后三倍频光的调制度和对比度,其中图 5(a)的条件和图 3(a)相同,倍频晶体的失谐角为  $200\ \mu\text{rad}$ ,图 5(b)的条件和图 4 相同。由图可见,光束质量随基频光的功率密度增大而变差,在功率密度为  $2.5\ \text{GW}/\text{cm}^2$  时,光强对比度存在明显的拐点,该点是三倍频效率最高的地方;整形目标焦斑变大时,对比度也呈增大趋势,并且焦斑越大,光束质量的变化越敏感。因此在应用  $1\omega$  CPP 需要注意:1) 基频光的功率密度不能超过三倍频效率曲线中最大效率对应的功率密度;2) 应根据整形目标焦斑的大小来确定  $1\omega$  CPP 能否使用。

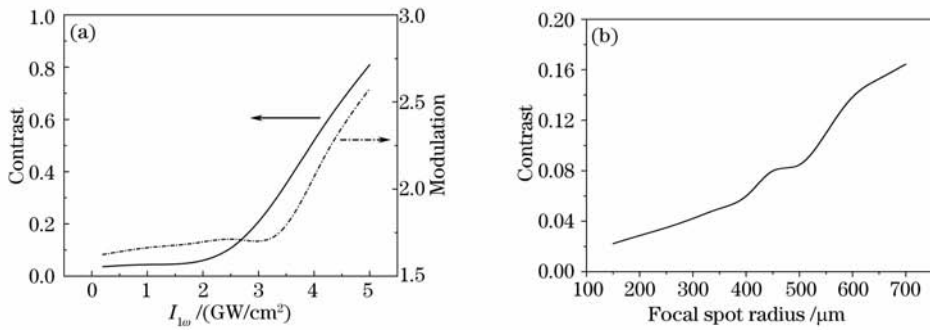


图 5  $1\omega$  CPP 对三倍频后光束质量的影响。(a) 不同功率密度下的光束对比度；(b) 不同目标焦斑大小时光束的对比度  
Fig. 5  $3\omega$  beam quality varied by  $1\omega$  CPP. (a)  $3\omega$  beam contrast varied by  $1\omega$  power density; (b)  $3\omega$  beam contrast varied by focal spot size

综合以上的分析,并对比  $1\omega$  CPP 对  $3\omega$  转换效率和光束质量的影响规律可知,三倍频后光束质量和三倍频的效率紧密相连, $1\omega$  CPP 对  $3\omega$  转换效率影响越大,对光束质量影响也越大。

### 3.4 基频光 CPP 对焦斑性能的影响

为进一步明确 CPP 应用在基频光端是否会对焦斑性能产生影响,用神光 III 原型装置的物理实验对焦斑特性的要求条件下设计的 CPP,模拟了采用

$1\omega$  CPP 和  $3\omega$  CPP 时远场的对比图,如图 6。从图可见两者对焦斑的控制并无差异,进一步的数值结果表明,两者的能量利用率分别为 97.77% 和 97.78%,顶部 10~100  $\mu\text{m}$  的均匀性的均方根(RMS)值分别为 18.37% 和 18.01%,差异均不超过 0.5%,在同时采用光谱色散匀滑<sup>[15]</sup>的条件下,这个差异完全可以忽略,这说明从焦斑特性的影响来说, $1\omega$  CPP 是完全可行的。

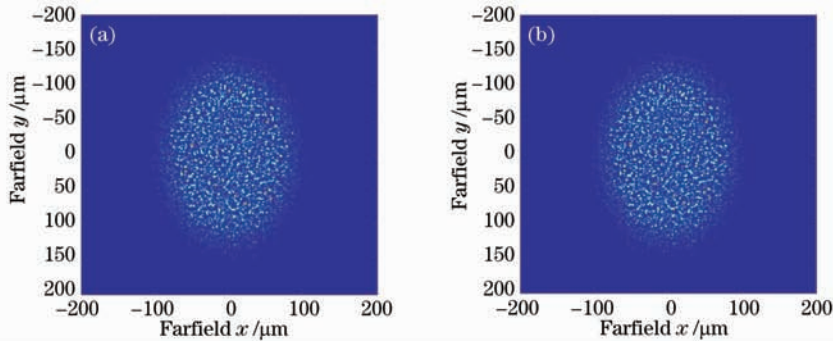


图 6  $1\omega$  CPP 和  $3\omega$  CPP 对焦斑性能影响的比较。(a)  $1\omega$  CPP 下对应的焦斑图；(b)  $3\omega$  CPP 对应的焦斑图  
Fig. 6 Comparison of focal spot with  $1\omega$  CPP and  $3\omega$  CPP. (a) Focal spot with  $1\omega$  CPP; (b) focal spot with  $3\omega$  CPP

## 4 结 论

从对焦斑的整形能力、三倍频转换效率、近场强度调制等方面详细分析了  $1\omega$  CPP 对光路带来的影响。研究表明, $1\omega$  CPP 可以满足焦斑的形态要求;在采用 KDP“ $I + II$ ”倍频方式下,失谐角越大,转换效率受的影响越大,且影响程度受目标焦斑大小的限制;对三倍频转换效率影响越大,三倍频光近场调制越大。针对神光 III 原型装置的焦斑目标, $1\omega$  CPP 可以满足各方面要求,具有应用潜力。所取得的结果具有重要的应用价值,对下一步 CPP 的研制原则、实验方式 and 应用都具有指导意义。

## 参 考 文 献

- Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(11): 3933~4024
- J. D.ilkenny, S. G. Glendinning, S. W. Haan *et al.*. A review of the ablative stabilization of the Rayleigh-Taylor instability in regimes relevant to inertial confinement fusion[J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5):1379~1389
- Kato Y, Mima K, Miyanaga N *et al.*. Random phasing of high power lasers for uniform target acceleration and plasma instability suppression[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**: 1057~1060
- Zhou Shenlei, Lin Zunqi. Irradiation uniformity by combining smoothing by spectral dispersion and lens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 275~279  
周申蕾,林尊琪. 光谱色散平滑与透镜阵列联用实现均匀照明[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 275~279

- 5 Zheng Jianzhou, Yu Qingxu, Lu Yongjun *et al.*. Improved lens arrays optical system with controllable focus width for uniform irradiation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 331~336  
郑建洲, 于清旭, 卢永军 等. 聚焦可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 331~336
- 6 Thomas I, Dixit S N, Rushford M C *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**: 417~419
- 7 Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Distributed phase plates for super-Gaussian focal plane irradiance profiles [J]. *Opt Lett.*, 1995, **20**(7): 764~771
- 8 Y. Lin, T. J. Kessler. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(20): 1703~1705
- 9 J. A. Marozas. Fourier transform-based continuous phase-plate design technique: a high-pass phase-plate design as an application for OMEGA and the National Ignition Facility[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(1): 74~83
- 10 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7): 1114~1118  
李 平, 马 驰, 栗敬钦 等. 基于焦斑空间频谱控制的连续相位板设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(7): 1114~1118
- 11 National Ignition Facility Performance Review, 1998: 231~235
- 12 Eimerl D, Auerbach J M, Milonni P M. Paraxial wave theory of second and third harmonic generation in uniaxial crystals. I. Narrowband pump fields [J]. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**(5): 1037~1067
- 13 Wang Fang, Su Jingqin, Li Keyu *et al.*. Increase law of near-field beam modulation in  $3\omega$  optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 92~97  
王 芳, 栗敬钦, 李恪宇 等. 三倍频光学系统中近场调制增长规律研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 92~97
- 14 Su Jingqin, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Simulation of the model of low-frequency phase aberration [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(s1): 163~166  
栗敬钦, 魏晓峰, 马 驰 等. 激光束低频畸变模型的计算模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(增刊): 163~166
- 15 Skupsky S, Short R W, Kessler T *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462