

# 三倍频光学系统中近场调制增长规律研究

王 芳 粟敬钦 李恪宇 韩 伟 贾怀庭 李富全 冯 斌

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 高功率固体激光装置的光束质量控制既要满足精密物理实验的苛刻要求,又要保证激光装置在高负载条件下的安全运行,是建造激光器的核心环节。三倍频光学系统承担着将  $1.053\ \mu\text{m}$  的基频光转换成  $0.351\ \mu\text{m}$  的三倍频光并聚焦到靶上的任务,是影响激光装置光束质量的重要环节。基于 B-T 理论研究了非线性传输条件下三倍频光学系统中光束调制的增长规律,基于典型的 KDP 晶体面形数据建立的中高频相位屏模型,通过数值计算获得了三倍频光学系统不同  $B$  积分下光束近场的变化规律。研究表明,三倍频光学系统中最快增长频率和相应的最快增长因子都是为基频光系统的三倍,空间调制周期在  $0.1\sim 1\ \text{mm}$  之间的空间频率成分增长最快。当三倍频光学系统  $B$  积分的设计值为 1.5,要求三倍频光近场调制度小于 1.15 时,中高频噪声的 RMS 值必须控制在 1.6 nm 以下。

**关键词** 三倍频光学系统; 近场光束质量; 非线性传输

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0092

## Increase Law of Near-Field Beam Modulation in $3\omega$ Optics System

Wang Fang Su Jingqin Li Keyu Han Wei Jia Huaiting Li Fuquan Feng Bin

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

**Abstract** Beam quality control is the most important segment in high power solid state laser facility construction, for the rigid requirement of precise physics experiments and the operation safety of laser facility in high capacity. The  $3\omega$  optics system converts the  $1\omega$  beams to the third harmonic, focuses them onto the target and is an important segment influencing beam quality. Based on the B-T theory, increase of beam modulation in  $3\omega$  optics was derived under the condition of nonlinear propagation. By the medium-high phase plate constructed according to the surface profile of typical KDP crystals, influence of  $\sum B_{3\omega}$  on beam near-field quality was investigated. The results show that the fastest increasing frequency and the corresponding fastest increasing factor in  $3\omega$  optics system are triple of those of  $1\omega$  system, and periods of spatial frequency between 0.1 mm and 1 mm increase fastest. The root-mean-error (RMS) of medium-high frequency aberration has to be less than 1.6 nm to acquire  $\sum B_{3\omega}$  of 1.5 and  $3\omega$  near-field contrast below 1.15.

**Key words**  $3\omega$  optics system; near-field beam quality; nonlinear propagation

## 1 引 言

高功率固体激光装置的光束质量控制既要满足精密物理实验的苛刻要求,又要保证激光装置在高负载条件下的安全运行,是建造激光器的核心环节。三倍频光学系统承担着将  $1.053\ \mu\text{m}$  的基频光转换成  $0.351\ \mu\text{m}$  的三倍频光并聚焦到靶上的任务,是影响激光装置光束质量的重要环节<sup>[1~7]</sup>。由于三倍频光学系统功率密度高,且紫外光成丝阈值相对红

外光要低得多<sup>[8,9]</sup>,补偿元件的插入将加大非线性介质的厚度,造成三倍频光学系统  $B$  积分增长,因此一般谨慎采用增加透射元件的方式来控制三倍频光束质量。通过控制基频光光束质量、提高三倍频光学元件加工水平以及控制非线性介质厚度是有效提高三倍频光束质量的方式。通过研究三倍频光束传输过程中光场变化的规律,为基频光光束质量和三倍频光学元件质量提出合理的指标确定理论依据

**基金项目:** 高温高密度等离子体国防重点实验室基金(9140C6803010802)资助课题。

**作者简介:** 王 芳(1983—),女,研究实习员,主要从事高功率激光光束质量控制方面的研究。

E-mail: wfoowf@yahoo.com.cn

是本文的主要目标。

## 2 理论分析

高强度非均匀光束在非线性介质中传输时,由于三阶非线性极化,会产生与强度相关的非线性折射率,从而导致非线性自聚焦现象。对于光束不同的空间调制,自聚焦现象具有不同的表现形式,通常包括全光束自聚焦和小尺度自聚焦。在高功率固体激光装置中,由于激光束口径很大,全光束自聚焦只是引起一个与强度轮廓成比例的相位延迟,对光束质量的影响较小。而小尺度自聚焦效应通过引起中高频噪声的非线性增长,造成光束分裂、引起介质丝状破坏等,是影响高功率激光器安全运行、限制其输出功率的主要因素。

从麦克斯韦理论出发可以推导出描述光束在介质中传输的非线性傍轴波动方程,其简化形式为:

$$\nabla_{\perp}^2 \epsilon + 2ik_0 \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = -2k_0^2 \frac{\Delta n}{n_0} \epsilon = -k_0^2 \frac{n_2 |\epsilon|^2}{n_0} \epsilon, \quad (1)$$

针对小尺度调制的具体情况,采取合适的假定来简化方程,可以求出近似解析解。首先,把一个带有调制的光束分解为一个强的本底场加上一个弱的调制场,即:

$$A(x, y, z) = A_s(z)[1 + e(x, y, z)], \quad (2)$$

式中  $A_s$  为电场在横截面上的平均值,在  $xy$  平面上均匀分布,而  $e$  为调制场的归一化值,无量纲,且满足“弱调制”条件  $|e| \ll 1$ 。令调制场为:

$$e(x, y, z) = u(x, y, z) + iv(x, y, z), \quad (3)$$

则由(1)式~(3)式不难获得如下的扰动变换关系:

$$\tilde{u}(z) = \tilde{u}_0 \cosh(gz) + \tilde{v}_0 \frac{f_{\perp}^2}{2k_0 g} \sinh(gz), \quad (4)$$

$$\tilde{v}(z) = \tilde{u}_0 \frac{2k_0 g}{f_{\perp}^2} \sinh(gz) + \tilde{v}_0 \cosh(gz),$$

其中  $\tilde{u}_0$  和  $\tilde{v}_0$  分别为输入调制场的扰动量,而  $\tilde{u}(z)$  和  $\tilde{v}(z)$  则为在非线性介质中经过传输距离  $z$  后的调制。式中  $g$  为小尺度扰动的增长因子,其表达式为<sup>[10]</sup>

$$g = \frac{K}{2k_0} \left( \frac{4k_0^2 \gamma I}{n_0} - K^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中  $K$  为空间波数,  $k_0$  为光波在真空中的波矢,  $\lambda$  为真空中的波长,  $\gamma$  为非线性折射率系数,  $n_0$  为线性折射率,  $I$  为平均光强。由于空间频率  $f = K/(2\pi)$ , 令

$$f_c = 2 \sqrt{\frac{\gamma I}{n_0 \lambda^2}}, \quad (6)$$

定义  $f_c$  为临界频率,则有:

$$g = \pi \lambda f (f_c^2 - f^2)^{1/2}. \quad (7)$$

由(5)式和(7)式可以看出:当空间频率大于  $f_c$  时,  $g$  为虚数,调制场的振幅将呈振荡状态,不会发生自聚焦;而当空间频率小于  $f_c$  时,调制场的振幅将指数增长。

对(7)式求导,当一阶导数为零时可以获得一个最快增长的频谱成分:

$$f_m = \sqrt{\frac{2\gamma I}{n_0 \lambda^2}}. \quad (8)$$

相应的最快增长因子为:

$$g_m = \frac{k_0 \gamma I}{n_0}. \quad (9)$$

从(8)式和(9)可以看出,对于固定的光学系统,  $\lambda$ ,  $\gamma$  和  $n_0$  都是不变量,  $f_m$  和  $g_m$  随着平均光强的增加而增长。在三倍频光学系统中,三倍频光的波长为基频光的三分之一,假设谐波转换过程中功率密度不变,由(8)式和(9)式可知,最快增长频率和相应的最快增长因子都将增长为基频光系统的三倍。

对于三倍频光学系统来说,光束在传输过程中不存在增益,忽略吸收和散射损耗,可以认为光束在整个系统中传输时强度不变。根据理论分析,可以将三倍频光学系统中光束的传输过程采用多个传输矩阵级联的方式来描述。不同空间调制尺度所对应的振幅谱、相位谱以及功率谱的增益曲线,如图1所示。与基频光系统非线性增益谱<sup>[2]</sup>相比,由于不存在能量增益,三倍频光学系统的非线性增益曲线中不存在非线性增益高但很无序的区域。三倍频光学系统中的最快增长频率增长为原来的三倍,非线性增益高且迅速增长的纹波区域向更高频移动,覆盖了空间调制周期为 0.1~1 mm 的区域。三倍频光学系统中存在晶体刀纹等引入的中高频相位调制,且没有空间滤波,非线性增益迅速增大到最大值,很容易引起非线性自聚焦,可能会发生光学元件损伤和破坏。

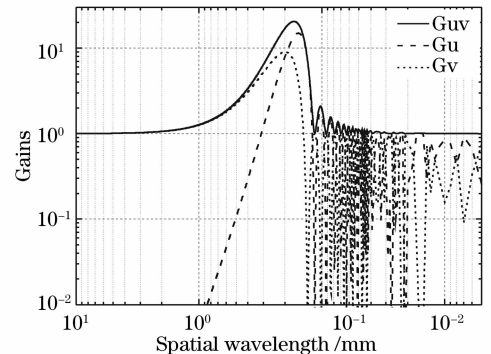


图1 不同空间周期的噪声所对应的非线性增益分布  
Fig.1 Nonlinear gain spectra of noises with different spatial periods

### 3 三倍频光束近场调制随 $\sum B_{3\omega}$ 增长的数值模拟

典型的三倍频光学系统除频率转换模块外,还包括聚焦透镜、谐波分离光栅和屏蔽片等光学元件,如图 2 所示。其中 BSG 表示谐波分离光栅,DS 则代表屏蔽片,它们的厚度均为 1 cm,两块 BSG 之间和两块 DS 之间的距离都是 3 cm,而 BSG 和 DS 之间的距离为 6 cm。

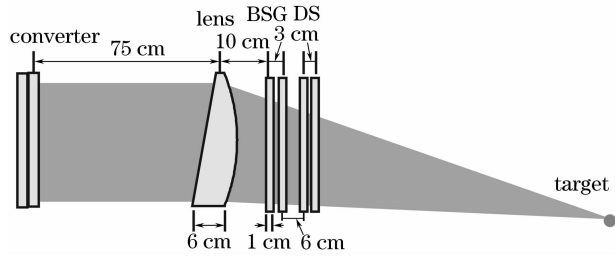


图 2 三倍频光学系统光路示意图

Fig. 2 Schematic of  $3\omega$  optical assembly

聚焦透镜、谐波分离光栅和屏蔽片都采用熔石英作为材料,折射率为 1.48,非线性折射率系数为  $2.1 \times 10^{16} \text{ cm}^2/\text{W}$ 。三倍频波长为 351 nm,假设平均功率密度为  $5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ ,则由(8)式和(9)式可知,最快增长频率为  $3.4 \text{ mm}^{-1}$ ,最快增长周期约为 0.3 mm,相应的最快增长因子为  $0.129 \text{ cm}^{-1}$ 。经过 10 cm 长的介质传输后,小尺度调制的最大增长

倍数可达:

$$G = \exp(g_m z) = \exp(12.9 \times 0.1) = 3.63. \quad (10)$$

此外,由  $B$  积分的定义有

$$B = \int g_m(z) dz \approx 1.3. \quad (11)$$

三倍频光学系统的中高频调制主要来源于晶体表面加工刀纹以及通过滤波器小孔的基频光近场调制。对神光 III 原型装置中实际使用的几组典型的 KDP 晶体面形和粗糙度的分析表明,晶体表面加工刀纹及纹波的调制周期覆盖几个微米到十几个毫米的范围,通常来说调制周期越大调制深度也越大,而百微米量级的刀纹深度大致为几个纳米。根据这一特点,我们利用中高频相位恢复程序,建立了反映晶体刀纹调制特点的随机相位屏,如图 3 所示。

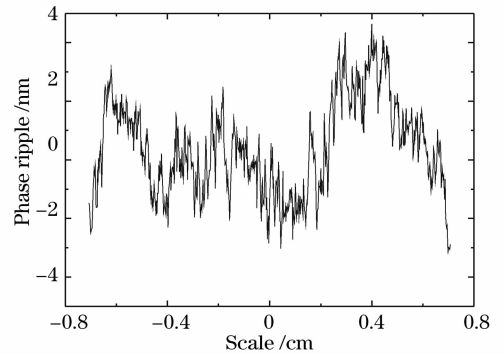


图 3 中高频随机相位屏

Fig. 3 Medium-high frequency random phase-plate

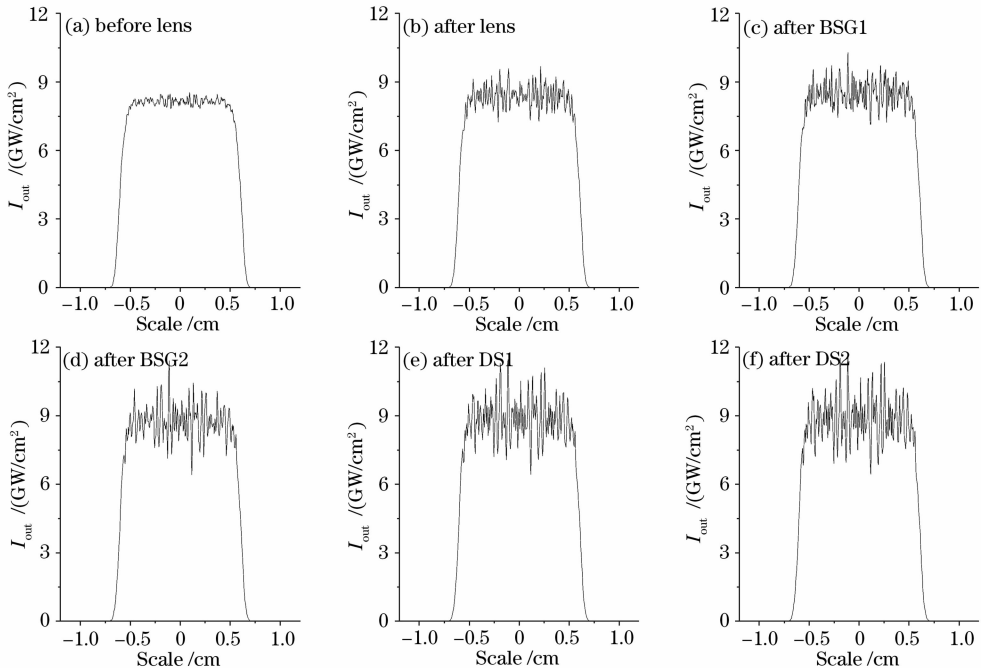


图 4 不同位置的三倍频光近场强度分布

Fig. 4 Near-field intensity distribution of  $3\omega$  beam at different positions

以下运用数值模拟方法分析不同调制深度的相位噪声在三倍频光学系统中的增长规律。为了在不增加计算量的前提下突出中高频噪声对三倍频光近场调制的影响,模拟中采用小口径光束进行研究。其中光束口径为 1.5 cm,计算口径 2.5 cm,采样精度为  $512 \times 512$ ,假设输出三倍频光场为理想的 8 阶超高斯分布。如图 4 所示为晶体相位扰动深度的

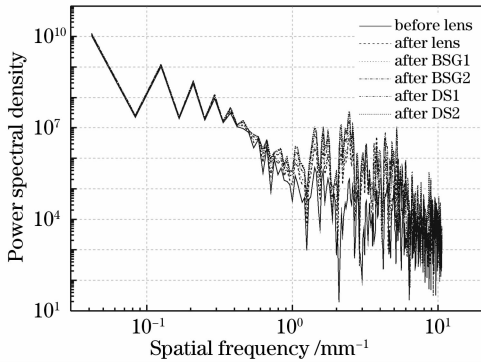


图 5 不同位置的三倍频光近场 PSD 曲线

Fig. 5 Near-field power spectral density of  $3\omega$  beam at different position

RMS 值为 1.6 nm 时不同位置的三倍频光近场强度分布,其中三倍频光的平均功率密度为  $6 \text{ GW/cm}^2$ 。图 5 则为相应的近场功率谱密度(PSD)曲线。由于楔形透镜厚度高达 6 cm,通过透镜时的非线性增长最为厉害,其它光学元件之间的差异相对要小。从图中可以很明显的看出,空间频率为  $1 \sim 10 \text{ mm}^{-1}$  之间的噪声成分的增益比较严重,这与理论分析的结果一致。

三倍频光学系统中频率转换器后的光学元件都为熔石英材料,损伤阈值基本相同,由图 5 可知,光束经过屏蔽片后的光场调制度最为严重,即屏蔽片是最容易损伤的元件,因此重点考虑屏蔽片位置的三倍频光近场光束质量。图 6 所示为不同  $\sum B_{3\omega}$  下的屏蔽片后的三倍频光近场强度分布,随着  $\sum B_{3\omega}$  的增长,三倍频光近场强度调制加剧,光束质量迅速下降,中高频相位噪声的 RMS 值较大时非线性增长更为严重。图 7 为相应的 PSD 曲线,随着  $\sum B_{3\omega}$  的增长,空间频率在  $1 \sim 10 \text{ mm}^{-1}$  之间的噪声成分增长最快,这与前面的理论分析一致。

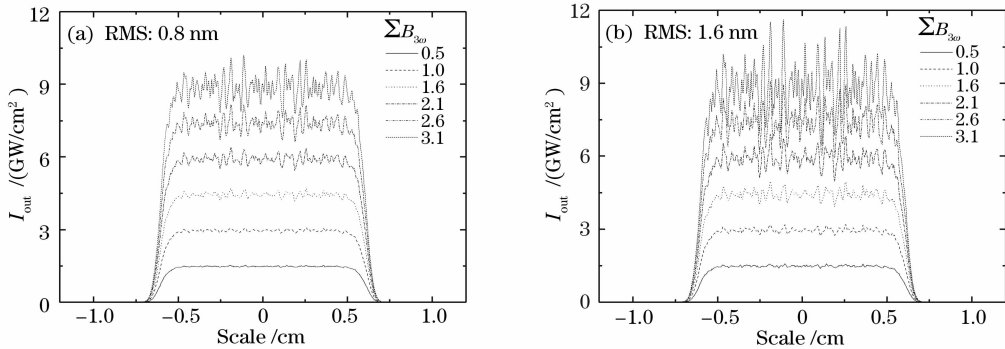


图 6 不同  $\sum B_{3\omega}$  下屏蔽片位置的三倍频光近场

Fig. 6 Near-field intensity distribution of  $3\omega$  beam at shield-debris with different  $\sum B_{3\omega}$

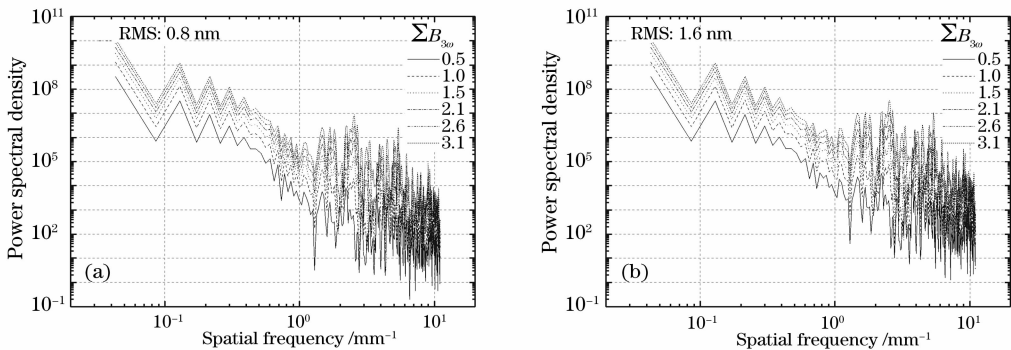
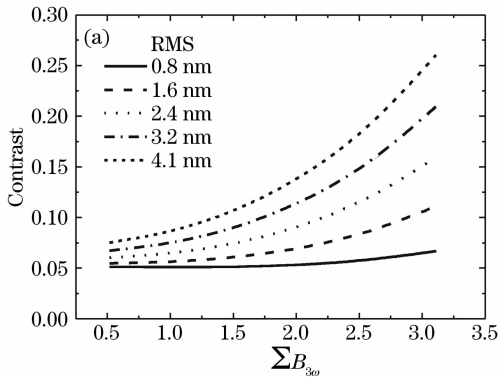


图 7 不同  $\sum B_{3\omega}$  下的输出三倍频光近场 PSD 分析

Fig. 7 Near-field PSD of output  $3\omega$  beam with different  $\sum B_{3\omega}$

根据计算得到的近场强度分布计算了不同三倍频  $B$  积分时的光束近场对比度和调制度,如图 8 所示。当  $\sum B_{3\omega}$  较小时,相位扰动深度对三倍频光近场的影响较小,但相位扰动较大的情况下近场强度



调制随着  $\sum B_{3\omega}$  的增长要快得多。若三倍频光学系统  $B$  积分的设计值为 1.5,要求三倍频光近场调制度小于 1.15,则中高频噪声的 RMS 值必须控制在 1.6 nm 以下。

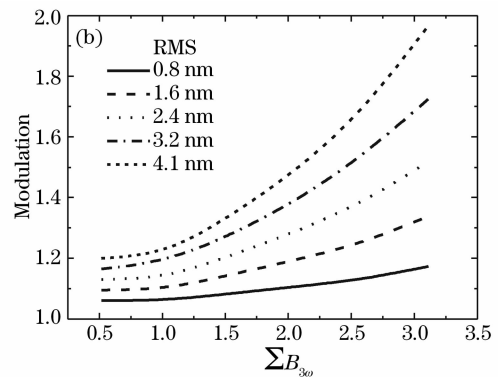


图 8 不同  $\sum B_{3\omega}$  下的输出三倍频光近场强度均匀性

Fig. 8 Near-field intensity uniformity of output  $3\omega$  beam with different  $\sum B_{3\omega}$

## 5 实验结果分析

从 2007 年的神光 III 原型装置高功率三倍频实验来看,三倍频晶体的出光面膜层整体发生损伤,并且损伤分布有明显的近场调制特征,如图 9 所示。此外,在打靶透镜、BSG 和屏蔽片上也出现了很多

损伤点,从损伤形貌上也可以看出近场调制的特征。虽然造成终端系统中光学元件损伤的原因有很多,三倍频光束质量对元件损伤还是有一定的贡献,因此控制终端光学系统中的噪声源,改善三倍频光束质量对提高三倍频系统的负载能力有重要意义。

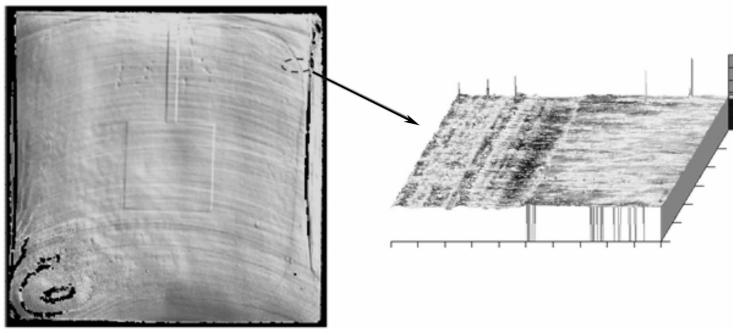


图 9 三倍频晶体膜层的破坏导致通光口径内膜层厚度变化

Fig. 9 Reduction of film thickness within beam-aperture due to the damage of film of tripler

## 6 结 论

本文基于 B-T 理论,采用解析方法研究了光束在三倍频光学系统中传输时不同空间频段噪声的增长规律。由于三倍频光学系统中激光波长为基频光的三分之一,在功率密度不变的情况下,最快增长频率和相应的最快增长因子都是为基频光系统的三倍,空间调制周期在 0.1~1 mm 之间的空间频率成分增长最快。采用数值模拟方法定量研究了不同三倍频光学系统  $B$  积分对近场光束质量的影响,当

$\sum B_{3\omega}$  较小时,相位扰动深度对三倍频光近场的影响较小,但相位扰动较大的情况下近场强度调制随着  $\sum B_{3\omega}$  的增长要快得多。初步研究表明,当三倍频光学系统  $B$  积分的设计值为 1.5,要求三倍频光近场调制度小于 1.15 时,中高频噪声的 RMS 值必须控制在 1.6 nm 以下。此外,从 2007 年神光 III 原型装置高功率三倍频实验结果来看,三倍频光束质量对元件的损伤有一定贡献,因此改善三倍频光束质量对提高三倍频系统的负载能力有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 D. Eimerl, R. Boyd, D. Milam *et al.*. The optical science laser: a new facility for laser research[R]. LLNL, ICF Quarterly Report, UCRL-LR-105821-91-3, 1991. 108~113
- 2 P. Wegner, J. Auerbach, T. Biesiada *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[R]. LLNL, UCRL-CONF-155817, 2004
- 3 C. C. Widmayer, J. M. Auerbach, R. B. Ehrlich *et al.*. Producing National Ignition Facility quality beams on the Nova and Beamlet lasers[C]. 12th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 1996
- 4 B. M. van Wonterghem, P. J. Wegner, J. K. Lawson *et al.*. Recent performance results from the national ignition facility beamlet demonstration project[C]. 12th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 1996
- 5 D. Milam, J. T. Hunt, K. R. Manes *et al.*. Modeling of filamentation damage induced in silica by 351 nm laser pulses[R]. LLNL, UCRL-JC-124925, 1996
- 6 Gu Zhen, Zhan Tingyu, Zhu Baoqiang *et al.*. Diffraction model on focusing properties of phase-modulated third harmonic beams [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(11): 988~990
- 7 顾 震, 詹庭宇, 朱宝强 等. 相位调制三倍频激光束聚焦特性的衍射模型[J]. *中国激光*, 2001, **28**(11): 988~990
- 7 Qian Liejia, Deng Ximing. Approximate model on transform of beam characteristics in frequency tripling [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(9): 1223~1226
- 7 钱列加, 邓锡铭. 三倍频激光束特性传输变换的近似模型[J]. *光学学报*, 1996, **16**(9): 1223~1226
- 8 P. J. Wegner, B. M. Van Wonterghem, S. N. Dixit *et al.*. Characterization of third-harmonic target plane irradiance on the national ignition facility beamlet demonstration project[J]. 12th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 1996
- 9 D. Milam, J. T. Hunt, K. R. Manes *et al.*. Modeling of filamentation damage induced in silica by 351 nm laser pulses[R]. LLNL, UCRL-JC-124925, 1996
- 10 Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Nonlinear theory of filamentation of intense laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1458~1462
- 10 文双春, 范滇元. 光束成丝的非线性理论[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1458~1462