

神光 II 升级系统中束匀滑对三倍频的影响分析

季来林^{1,2} 刘 崇¹ 朱宝强¹ 邬 融¹ 周申蕾¹ 林尊琪¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 基于非线性耦合波方程分析了神光 II 升级系统中束匀滑技术对三次谐波转换过程的影响。模拟结果显示: 400 μm 焦斑所采用的连续相位板将引起 1.4% 左右的效率下降, 近场对比度增加量约为 0.02, 均在可接受范围内; 但当焦斑达到 800 μm 时将会引起 6% 左右的效率下降, 并导致近场对比度增加近 0.05, 无法兼容目前系统设计, 必须进一步优化连续相位板设计方案; 而谱色散匀滑技术引入光谱展宽达到 60 GHz 时将引起 5% 左右的效率下降, 且会引发明显的时间纹波扰动; 但是谱色散匀滑引入的空间角谱扫描并不会明显影响谐波转换效率, 因此在高通量运行时, 需要适当减小调制带宽以提高谐波转换效率和系统的稳定性。

关键词 非线性光学; 束匀滑; 三次谐波转换; 高功率激光

中图分类号 O437.4; O780 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1219002

Analysis of Influence of Beam Smoothing on Third Harmonic Generation in SGII Upgrade

Ji Lailin^{1,2} Liu Chong¹ Zhu Baoqiang¹ Wu Rong¹ Zhou Shenlei¹ Lin Zunqi¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Shanghai Institute of Laser and Plasma, Chinese Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

Abstract The influence of beam smoothing on third harmonic generation (THG) in SGII upgrade is analyzed with the nonlinear coupled wave equation. Simulation results show that the continuous phase plate (CPP) designed for 400 μm focus spot causes the conversion efficiency decreasing by 1.4% or so, and the contrast of near field increasing by 0.02 or so in theory, which is within the acceptable tolerance. While the focus spot reaches 800 μm , the conversion efficiency decreases by about 6% and the contrast increases by 0.05 or so, which is out of the acceptable tolerance, and the scheme of the CPP should be improved. The 60 GHz bandwidth of smoothing by spectral dispersion (SSD) causes the conversion efficiency decreasing by about 5%, with obvious temporal intensity modulation, but influence of the divergence caused by SSD is very small. To maintain the stability of the THG, the bandwidth should be reduced reasonably at high fluence operation.

Key words nonlinear optics; beam smoothing; third harmonic generation; high power laser

OCIS codes 190.2620; 190.2640; 190.4360

1 引 言

在激光惯性约束聚变的内爆过程中, 靶面辐照均匀性是实现成功点火的关键条件。实现靶面均匀辐照的技术又称为光束匀滑技术, 高功率固体激光驱动器主要采用了焦斑整形和焦斑平滑相结合的技术方案: 通过整形获得特定包络分布的焦斑, 然后由

平滑技术抹去焦斑中高频的不均匀性。目前连续相位板(CPP)^[1]结合谱色散匀滑(SSD)^[2]已成为主流的焦斑束匀滑技术。CPP 基于混合型分布相位板设计, 通过连续变化的相位分布, 使焦斑的能量利用率达到 95% 以上, 成熟的磁流变加工工艺可以比较容易地完成 CPP 的制作, 是目前最为理想的一种

收稿日期: 2013-06-14; 收到修改稿日期: 2013-08-07

作者简介: 季来林(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: jsycjll@siom.ac.cn

导师简介: 林尊琪(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光技术方面的研究。

E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

焦斑整形技术。SSD 由罗彻斯特大学的 Skupsky 等^[2]于 1989 年提出,该技术基于正弦相位调制的时域光谱展宽方式,在光路中引入色散光栅,将不同频率的光在空间域上扫开形成不同的角谱,在一定的时域尺度范围内,由于 SSD 的角谱扫动,整形焦斑的中高频不均匀性将得到有效抑制,但高功率固体激光驱动器的三次谐波 (THG) 转换过程中的相位匹配对光束的发散和光谱带宽非常敏感,因此需要在焦斑匀滑和高效谐波转换之间寻求平衡。不同装置由于设计差别,束匀滑对三次谐波转换过程的影响也存在一定的差别,本文主要分析 SGII 升级装置中束匀滑技术对三倍频的转换效率、近场均匀性以及时间波形调制的影响。

2 神光 II 升级系统的终端和三倍频系统设计

神光 II 升级装置的终端光学组件为了满足较高通量运行的需求,对谐波转换方式、真空密封方式、谐波分离和激光参数测量方式进行了改进,同时为了满足物理实验的需求,增加了焦斑束匀滑的功能,采用模块化设计。图 1 为神光 II 升级系统的终端光学排布结构示意图。在终端入射窗口前放置用于束匀滑的 CPP,三倍频系统由两块正交磷酸二氢钾 (KDP) 晶体组成,三倍频系统下游放置楔形透镜用于光束远场色分离和聚焦打靶,透镜焦距为 2234 mm,用于取样测量的衍射光栅,其取样率为 0.5%。

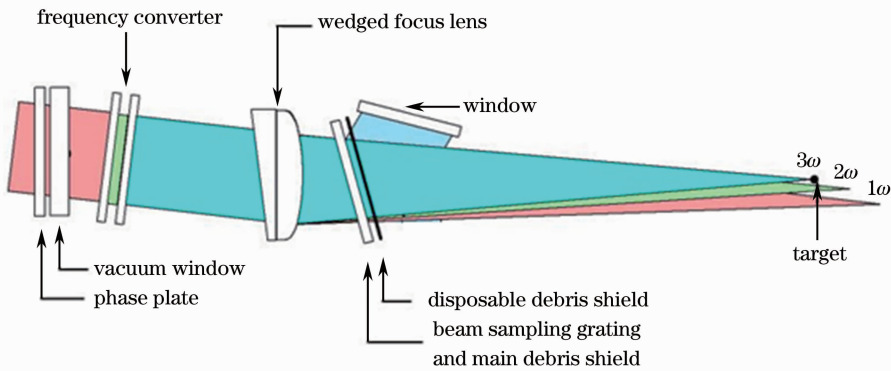


图 1 终端的光学排布结构示意图

Fig. 1 Scheme of optical configuration of final optical assembly

神光 II 升级系统设计基频运行平均通量约为 5.2 J/cm^2 ,近场填充因子优于 0.6,整形椭圆焦斑长轴为 $400 \sim 800 \mu\text{m}$,根据具体物理实验确定。为兼顾系统运行的动态光强范围和系统的接受角宽,神光 II 升级装置采用 12.5 mm Type-I KDP 二次

谐波 (SHG)/10.5 m Type-II KDP THG 设计,如图 2 所示,光束口径为 $310 \text{ mm} \times 310 \text{ mm}$,晶体口径为 $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,基频抽运光约为 2 GW/cm^2 ,倍频晶体最佳失谐角为 $170 \mu\text{rad}$ 。考虑材料的吸收和膜层损耗等影响后,理想平面波条件下输出效率接近 83.5%。图 3 显示在 2 GW/cm^2 的基频抽运光强下

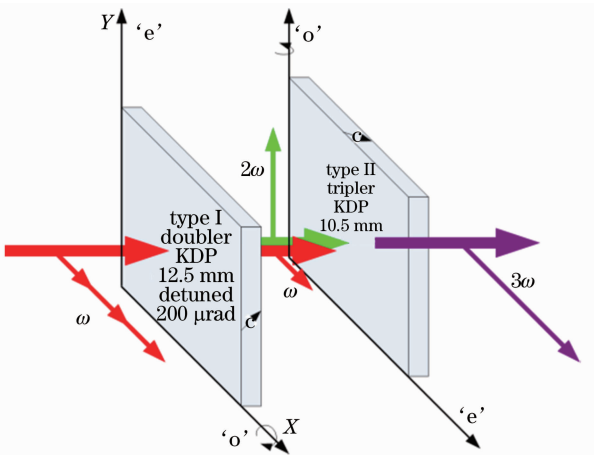


图 2 神光 II 升级系统三次谐波转换系统的示意图

Fig. 2 Scheme of third harmonic generation for SGII upgrade system

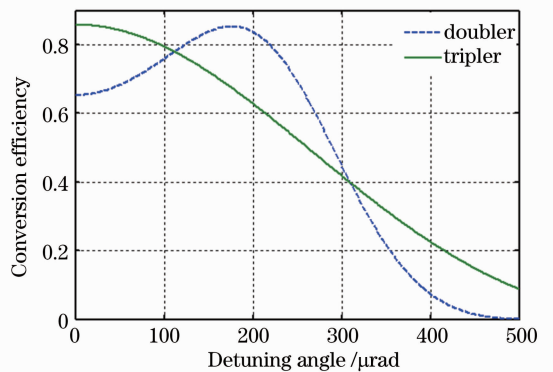


图 3 神光 II 升级装置三次谐波转换效率随倍频和三倍频晶体失谐角度的变化

Fig. 3 Conversion efficiency versus detuned angle of doubler and tripler of SGII upgrade

三次谐波转换效率随倍频失谐角以及三倍频失谐角度的变化,当倍频晶体失谐角度为 $170 \mu\text{rad}$ 时有最佳转换效率,80%转换效率对应的倍频晶体允许失谐角度范围约为 $\pm 50 \mu\text{rad}$,三倍频晶体约为 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 。

3 CPP 束匀滑技术的影响

3.1 CPP 所引起的扰动与影响描述

CPP 实质是列阵透镜^[3]改良,将光束在空间上分割,每个单元具有不同的微小楔角,使远场焦斑弥散成一定的形状包络,单元尺度一般在 10 mm 量级,所以 CPP 技术一般会引入中低频尺度的扰动。高功率激光驱动器低频扰动一般采用波前梯度均方差(G_{rms})来描述^[4-5],单位为 nm/cm ,它与焦斑的形状和尺度有很好的关联性,理论模拟证实焦斑 80% 环围能量对应焦斑尺寸和分布主要由 G_{rms} 决定^[4],而 95% 环围能量以外的形态主要由波前功率谱密度(PSD)决定。虽然 CPP 所引入的调制尺度一般在 10 mm 量级,但其梯度的均方差仍可以很好地表征 CPP 所引起的扰动

影响的幅度。从几何光学角度理解, $L(x, y)$ 代表光束传输方向某个截面上的光程差分布,量纲为 nm ,则局域的梯度 $\sqrt{(\partial L/\partial x)^2 + (\partial L/\partial y)^2}$ 对应的量纲为 nm/cm ,代表局域的波矢与光束传输方向的夹角,因此 CPP 的 G_{rms} 值基本表征其引起的光束发散角度。神光 II 升级系统 $400 \mu\text{m}$ 整形焦斑所采用 CPP 对应的 G_{rms} 接近 $200 \text{ nm}/\text{cm}$,如图 4(b)所示为其梯度分布,由此可以估算其引起的空间发散角度在几十到百微弧度之间。由于谐波转换过程中相位匹配与波矢方向密切相关,谐波转换系统允许的失谐角度与此扰动大致相当,因此扰动一方面会导致谐波转换效率下降,另一方面会影响三次谐波输出近场均匀性,导致局域负载的增加,例如美国国家点火装置(NIF)2012 年报道中要求连续相位板元件所引起的三倍频近场对比度增加不得高于 5%,针对大焦斑进一步设计优化 CPP 和使用方式,将原先基频 CPP 改成基频和倍频 CPP 两块,使其引起的扰动影响减少到最低。

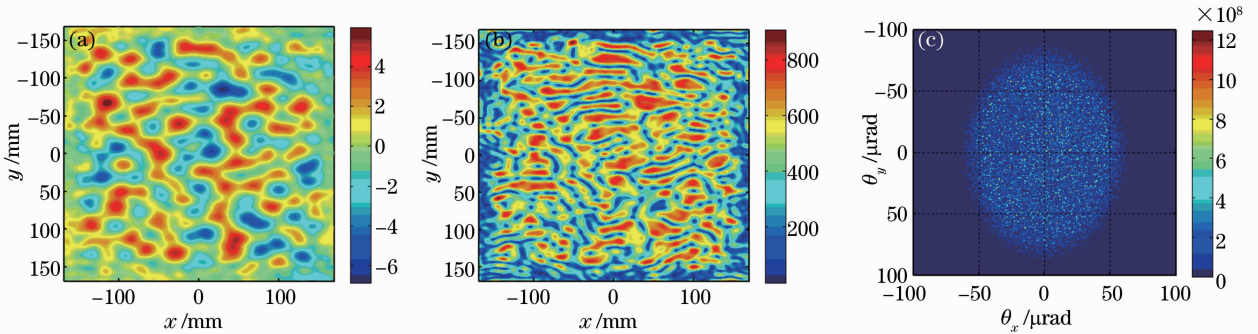


图 4 设计的连续相位板(a)相位和(b)梯度分布以及(c)三倍频远场焦斑

Fig. 4 (a) Phase and (b) gradient distribution of CPP and (c) corresponding 3ω far field focus spot

升级系统采用连续相位板方案,初步设计远场焦斑约为 $400 \mu\text{m} \times 280 \mu\text{m}$,呈椭圆形分布,图 4(a)为理论设计的放置于晶体前的基频连续相位板扰动,图 4(b)和(c)为其波前梯度和对应的三倍频远场分布,其 G_{rms} 值为 $192 \text{ nm}/\text{cm}$,对应的三倍频远场分布覆盖空间角范围约为 $180 \mu\text{rad} \times 125 \mu\text{rad}$,在设计过程中假设入射波为理想平面波,近场为超高斯光强分布,以及三倍频的波前 $\phi_{3\omega} = 3\phi_{1\omega}$ 。另外针对物理实验有可能要求更大尺寸焦斑,可以通过增加 CPP 的刻蚀深度以增加焦斑的尺寸,目前所要求的最大焦斑接近 $800 \mu\text{m}$ 。

3.2 CPP 对三次谐波转换的影响分析

基于 Type I SHG/Type II THG 的标准物理模型和耦合波方程^[6-8],研究 CPP 所引入的波前扰动的影响,为突出 CPP 的影响,在模拟过程中不考

虑基频光本身的波前扰动以及近场分布不均匀的影响,入射到倍频晶体前的基频电场分布为

$$E_{\omega} = \left(\frac{2I_{\omega}}{c\epsilon_0} \right)^{1/2} \exp \left\{ -0.5 \times \left[\left(\frac{x}{W} \right)^{20} + \left(\frac{y}{W} \right)^{20} \right] \right\} \times \exp(i\phi_{1\omega}), \quad (1)$$

式中 I_{ω} 为入射的基频光强,接近 $2 \text{ GW}/\text{cm}^2$,光束近场为 40 阶的超高斯分布,光束口径 $310 \text{ mm} \times 310 \text{ mm}$ (1%强度), $\phi_{1\omega}$ 为对应的基频连续相位板的扰动, W 为光束口径参数,计算中取值为 150 mm , c 和 ϵ_0 为真空中的光速和介电常数。

图 5(a)和(b)分别对应椭圆焦斑长轴沿三倍频敏感方向和倍频敏感方向时的三倍频近场光强扰动。可以看出,当长轴沿倍频敏感方向时,引起的扰动更强烈,效率下降也更明显,这是由于 Type I SHG/Type II THG 三次谐波转换方案对倍频晶体

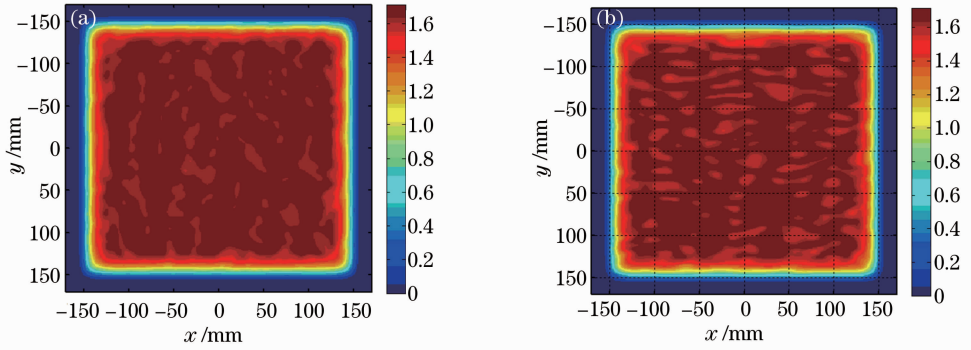


图 5 400 μm 焦斑 CPP 所对应的三倍频的近场。(a) 焦斑长轴在三倍频敏感方向; (b) 焦斑长轴在倍频敏感方向
 Fig. 5 3ω near field with CPP for the 400 μm focal spot. (a) Major axis along tripler's 'e' axis; (b) major axis along doubler's 'e' axis

失谐角度非常敏感,且接收角宽只有三倍频晶体的 $1/2$,因此在 CPP 使用过程中必须注意将扰动大的维度安置在三倍频敏感方向^[8]。

图 6 显示升级中采用基频 CPP 时,三倍频焦斑尺寸控制在 400 μm 时引起的效率下降在 1.4%~1.8% 之间,这取决于焦斑长轴的方向。从图 7 中可以看到,当长轴沿三倍频敏感方向时,基频 CPP 引起的近场对比度增加 0.02 左右。但是当长轴增加到 800 μm 时效率下降接近 6%,近场对比度增加 0.06,近场峰均比增加更加明显,局域负载增加约 10%,已超出设计允许范围。

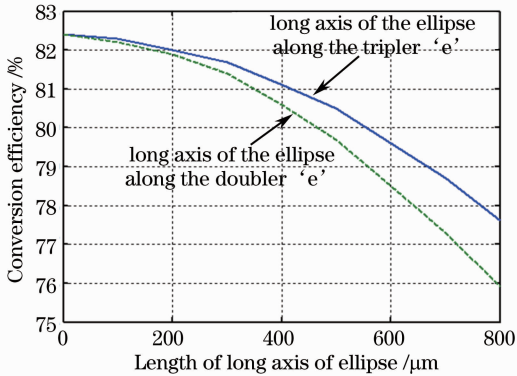


图 6 转换效率随焦斑长轴尺寸的变化
 Fig. 6 Conversion efficiency versus length of major axis of focal spot

升级系统目前 CPP 设计可以安置在基频段,但是当增加刻蚀深度,焦斑超过 500 μm 后,三次谐波转换效率的下降以及近场峰均比的增加将会非常明显,必须改进设计方案。可以参考 NIF 2012 年的方案,将目前单块基频 CPP 设计改成基频 CPP 和倍频 CPP 两块联合使用,分别进行两个维度的整形,基频段 CPP 引起的焦斑匀滑方向沿三倍频敏感方向,而倍频 CPP 引起的焦斑匀滑方向沿倍频敏感方向,从而将光

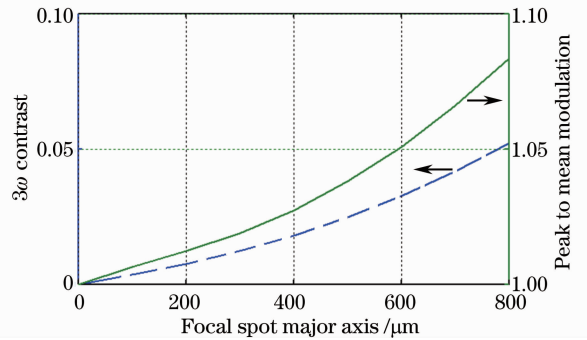


图 7 CPP 所引起的三倍频近场调制变化,实线对应峰均比,虚线对应调制度
 Fig. 7 Modulation of 3ω near field caused by CPP, solid line corresponds to peak to mean, and dashed line corresponds to 3ω contrast

束发散对谐波转换的影响减少到最低。

另外比较有实际工程意义的问题是,如果谐波转换系统存在一定的失谐,基频 CPP 所引起的近场调制变化将会如何演化。如表 1 所示,虽然倍频晶体失谐 170 μrad 时有最高转换效率,但是在倍频晶体失谐角度为 0 时, CPP 引起的近场调制却更小,这是由于倍频转换效率随倍频失谐角度 θ 变化的导数在 $\theta=0$ 时 $\partial\eta_{2\omega}/\partial\theta=0$,则 CPP 引起的光束发散对倍频效率影响降低到最小,但这会导致三倍频过程中倍频光子数大于基频光子数而引起效率下降,同时理论研究表明在倍频失谐角度为 0 时,其高效转换的光强动态范围也在减小,这也会部分提高三倍频输出光强的均匀性。

美国罗切斯特大学 OMEGA EP 的装置在运行过程中有意识地控制倍频晶体失谐角度,使三次谐波转换效率维持在 40% 附近,从而提高三倍频近场均匀性以降低分离膜的局域负载,因此 CPP 实际使用面临综合平衡的问题,在减小对效率的影响的同

时还必须保证一定的近场均匀性,某些特殊情况下,可以通过牺牲效率以换取更好的近场均匀性^[9]。

表 1 倍频匹配角失谐的影响

| Table 1 Influence of detuning angle of doubler | | | |
|--|--------|--------|--------|
| Detuning angle of doubler / μrad | 170 | 100 | 0 |
| Conversion efficiency / % | 81.1 | 75.2 | 66.8 |
| Contrast | 0.0243 | 0.0456 | 0.015 |
| Peak to mean | 1.0349 | 1.0889 | 1.0296 |

4 SSD 技术的影响分析

SSD 是目前高功率固体激光驱动器中广泛采用的焦斑匀滑技术,基于正弦相位调制的时域光谱展宽,通过在光路中引入色散光栅,不同频率的光将在空间域上扫开形成不同的角谱,联合相位板技术,在一定的空间尺度范围内,由于 SSD 的角谱扫动,整形焦斑的中高频不均匀性将得到有效的抑制。一维 SSD 技术引入的相位扰动形式如下^[10-12]:

$$\varphi_{\text{SSD}} = \sigma \sin(2\pi ft + 2\pi f\xi x), \quad (2)$$

式中 σ 为调制深度, f 为调制频率,调制带宽为 $\Delta\nu = 2\sigma f$, 升级系统采用 3 GHz 的调制频率, $\xi = 0.3 \text{ ns/m}$ 为光栅引入的角色散参数,即每米引入的时间延迟为

0.3 ns, $f\xi$ 对应的空间扰动频率为 0.0009 mm^{-1} 。

SSD 引起的光束发散沿三倍频敏感方向,输入基频电场采用以下形式:

$$E_{\omega} = \left(\frac{I_{\omega}}{2c\epsilon_0} \right)^{1/2} \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{x}{W_1} \right)^2 \right] \times \exp(i\varphi_{\text{SSD}}) \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{t}{\tau} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中 $W_1 = 60 \text{ mm}$, $\tau = 0.5 \text{ ns}$ 分别为空间和时间窗口宽度参数。如(3)式所示,为减小模拟过程中的傅里叶变换计算量,所取横向口径尺度为 120 mm,窗口为 250 mm,空间取样间隔接近 1 mm,时间窗口为 1 ns,时间取样间隔约 2 ps。

图 8 展示了基频调制带宽为 60 GHz 时,三倍频的两维时空强度分布以及一维时间分布,可以看到在 2 GW/cm^2 基频抽运运行条件下,60 GHz 的基频调制带宽已经可以引起非常可观的三倍频时间强度调制,纹波调制对比度 γ [具体定义可以参看(4)式,定义 I_{max} 、 I_{min} 分别为近场调制的最大、最小值] 已经趋于 0.1。

$$\gamma = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}. \quad (4)$$

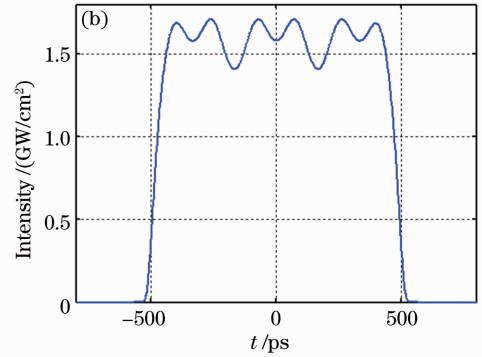
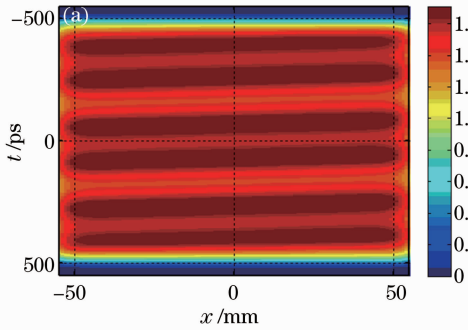


图 8 模拟三倍频的(a)两维时空分布以及(b)时间强度分布

Fig. 8 Simulations of 3ω (a) spatio-temporal distribution and (b) intensity-temporal profile

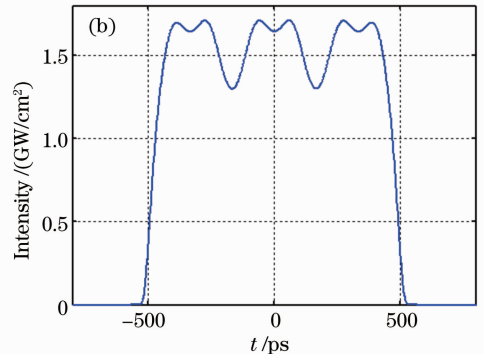
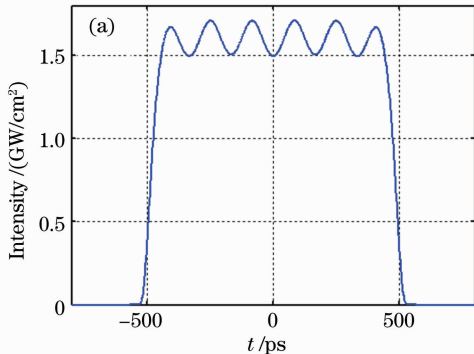


图 9 不同三倍频失谐角下的相位调制引起的纹波。(a) 0; (b) $60 \mu\text{rad}$

Fig. 9 Temporal wavinesses arising from phase modulation at different detuning angles. (a) 0; (b) $60 \mu\text{rad}$

模拟过程中三倍频晶体人为设置失谐角度为 $30 \mu\text{rad}$, 因此看到纹波并不是非常对称, 失谐在一定程度上加大了纹波调制深度。理论模拟显示纹波对比度对三倍频角度失谐量非常敏感, 如图 9 所示, 在三倍频失谐角度为 0 时纹波调制对比度只有 0.06, 在 $60 \mu\text{rad}$ 失谐量下已超过 0.14, 因此在实际运行中需要控制三倍频匹配角精度优于 $30 \mu\text{rad}$, 另外还可以从相位调制脉冲的三倍频时间波形评估晶体匹配状态, 对于实际运行有非常大的帮助。

升级系统 SSD 束匀滑调制带宽设计不超过 60 GHz, 则所引起的最大空间发散角在 $18 \mu\text{rad}$ 左右, SSD 所引起的波面发散相对于 CPP 来说是非常小的量, 其引起的效率下降不超过 0.5%, 因此效率下降主要原因来自于光谱展宽所引起的相位失配, 具体调制带宽对谐波转换效率的影响可以参见图 10。30 GHz 调制带宽时谐波转换效率下降 1.5% 左右, 60 GHz 调制带宽引起效率下降已经接近 5%, 随着调制带宽增加效率下降越发明显, 因此实际运行时必须考虑带宽与抽运光强的平衡。在高通量下运行时, 适当降低调制带宽, 以提高谐波转换效率和系统的稳定性。例如 NIF 运行如无特殊说明, SSD 所加调制带宽仅 45 GHz^[4]。

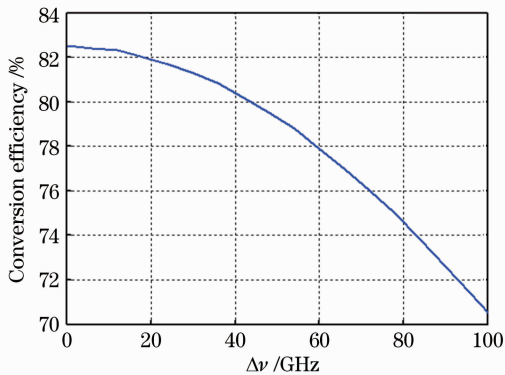


图 10 升级系统三次谐波转换效率随调制带宽的变化

Fig. 10 Conversion efficiency versus modulation bandwidth

5 结 论

神光 II 升级系统中, 光束束匀滑技术所引起的空间角谱和频谱展宽对三次谐波转换过程的光束质量和效率存在一定的影响, 其中 CPP 所引入的角谱

展宽(梯度均方差约为 200 nm/cm)导致的转换效率下降和光束近场质量退化基本可以接受, 但 SSD 技术所引入的光谱展宽(60 GHz)将会导致三倍频产生明显的幅度调制, 并引起 5% 左右的效率下降, 因此 SSD 设计需要进一步优化, 在高通量运行时适当减小调制带宽以及多频调制, 以提高系统输出的稳定性。

参 考 文 献

- 1 Y Arieli. A continuous phase plate for non-uniform illumination beam shaping using the inverse phase contrast method [J]. Opt Commun, 2000, 180(4): 239–245.
- 2 S Skupsky, R W Short, T Kessler, *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. J Appl Phys, 1989, 66(8): 3456–3462.
- 3 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen, *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. Appl Opt, 1986, 25(3): 377–381.
- 4 W Williams, J Auerbach, J Hunt, *et al.*. NIF Optics Phase Gradient Specification [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, CA, 1997. UCRL-ID-127297.
- 5 J K Lawson, J M Auerbach, R E English, *et al.*. NIF optical specifications; the importance of the rms gradient [C]. SPIE, 1999, 3492: 336–343.
- 6 D Eimerl, J M Auerbach, P W Milonni. 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.
- 7 P W Milonni, J M Auerbach, D Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [C]. SPIE, 1997, 2633: 230–241.
- 8 P Wegner, J Auerbach, T Biesiada, *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning [C]. SPIE, 2004, 5341: 180–189.
- 9 Wang Fang, Feng Bin, Li Fuquan, *et al.*. Formation and suppression of amplitude modulation in frequency conversion [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302014.
王芳, 冯斌, 李富全, 等. 频率转换过程中强度调制的形成机制及抑制方法[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302014.
- 10 Li Jinghui, Zhang Hujie, Zhou Shenlei, *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion considering the hole used in spatial filter [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 827–832.
李菁辉, 张琥杰, 周申蕾, 等. 空间滤波器小孔对谱色散匀滑使用效果的影响[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 827–832.
- 11 Feng Wei, Li Jinghui, Zhou Shenlei, *et al.*. Experimental study of two-dimensional smoothing by spectral dispersion with distributed phase plates [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 053001.
冯伟, 李菁辉, 周申蕾, 等. 分布式相位板联合二维谱色散匀滑的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 053001.
- 12 Zhou Yuliang, Sui Zhan, Liu Lanqin, *et al.*. Research on beam smoothing technology for high-power laser system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 101407.
周煜梁, 隋展, 刘兰琴, 等. 高功率激光装置光束匀滑技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101407.

栏目编辑: 史敏