

大口径 KDP 晶体加工相位扰动与三次谐波转换

季来林^{1,2} 刘崇¹ 唐顺兴¹ 陈明² 冯伟² 朱宝强¹ 马伟新² 朱俭² 戴亚平² 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中国科学院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 根据神光 II 三次谐波转换中的各种现象, 分析了晶体中高频周期相位调制的影响。目前国内大口径 KDP 晶体在中高频段存在强烈周期性相位调制, 相位调制周期约 20 mm, 调制幅度约 35 nm, 导致三次谐波近、远场产生明显的强度调制, 实验测得三倍频的近场周期条纹对比度在 0.1~0.3 之间, 周期约 12 mm, 理论分析该周期相位调制导致光束下游元件产生自聚焦风险明显增大, 并且会引起三倍频远场畸变分裂, 可聚焦能力下降。中高频段的周期调制可能来自于晶体加工过程中真空吸附, 需要进一步实验判断并在加工中消除周期性的相位扰动。

关键词 非线性光学; 相位扰动; 三次谐波转换; 晶体加工

中图分类号 O437.4; O780 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0502012

Phase Perturbation of Large Aperture KDP Crystal Manufacture and Effects on Third Harmonics Generation

Ji Lailin^{1,2} Liu Chong¹ Tang Shunxing¹ Chen Ming² Feng Wei²

Zhu Baoqiang¹ Ma Weixin² Zhu Jian² Dai Yapin² Lin Zunqi¹

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

Abstract The effects of period phase perturbation of large aperture KDP crystal in middle spatial frequency are analyzed based on the results of experiments of Shenguang II. The period of phase perturbation of crystal reflection wavefront is near 20 mm, and the modulation amplitude is about 35 nm, the period of the third harmonics near field is about 12 mm, the contrast of strip is between 0.1 and 0.3, which leads to 3ω far field distortion and the probability of self-focusing increase. This cycle modulation at medium high frequency is possible caused by vacuum siphon in the process of crystal manufacture, and it needs to be verified in the follow-up experiment.

Key words nonlinear optics; phase perturbation; third harmonic generation; crystal manufacture

OCIS codes 190.4420; 120.4610; 260.1180

1 引言

三次谐波转换单元是高功率激光驱动器重要组成部分, 已有 30 多年的发展历史, 一般均采用大口径 KDP 和 DKDP 晶体作为非线性材料, 使用“II + II”或“I + II”级联方式, 实现三次谐波转换。如美国欧米咖装置采用“II + II”类相位匹配方案, 该方案对基频光偏振非常敏感, 为保证高效谐波转换, 在晶体前使用大口径偏振片, 线偏度优于 500:1, 高光强 ($I_{\text{average}} \approx 1.8 \text{ GW/cm}^2 @ 1\omega$) 条件下三次谐波转换

效率大于 70%^[1,2]; 美国国家点火装置(NIF)中采用“I + II”类相位匹配方案, 该方案对倍频失谐角非常敏感, 在高光强 ($3 \text{ GW/cm}^2 @ 1\omega$) 条件下, 倍频失谐角须控制在 $\pm 30 \mu\text{rad}$ 以内, NIF 报道其谐波转换效率最高可达 80% 以上, 单路输出 $1 \times 10^4 \text{ J}$ 紫外光^[3,4]。

国内的高功率激光驱动器发展起步很早, 如 SG-II, SG-III 原型都配有三次谐波转换单元。在谐波转换单元技术发展方面基本与国际同步, 但谐波

收稿日期: 2011-12-28; 收到修改稿日期: 2012-02-20

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: jsycjl@siom.ac.cn

导师简介: 林尊琪(1942—), 男, 中国科学院院士, 主要从事高功率激光技术方面的研究。

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

转换效率一般在 65%，低于国外同类装置水平。原因主要有两方面：1) 基频光束质量，如近场填充因子、对比度、时间波形、波前特性；2) 谐波转换单元大口径晶体特性，如材料均匀性、反射、透射波前等。

定量研究各类参量对谐波转换的影响需要大量的诊断数据，目前国内在晶体的诊断测量方面尚有不足，本文基于目前神光-II 的部分实验现象和结果，对高功率激光驱动器谐波转换过程中周期性调制问题做简单的分析。

2 晶体加工相位调制与相关现象

大口径 KDP 晶体由于其特殊的物理化学特性，一般采用金刚石车床飞切，与传统光学加工相比，加工质量有一定差距，表 1 列举了国外^[4]与国内晶体透过波前、反射波前、粗糙度、波前梯度、波前均方根(RMS)的典型结果，PV 表示峰谷值。

表 1 晶体加工关键指标的对比

Table 1 Comparison of the key parameters of KDP crystal

| Parameters | NIF | SG II |
|--|-------------------------|----------------------|
| Roughness | <1.5 nm(RMS2) | ~2 nm(RMS2) |
| Transmitted wavefront@633 nm | < $\lambda/4$ | ~ λ |
| Transmitted waterfront gradient (>33 mm) | 11 nm/cm(RMS) | ~50 nm/cm |
| Surface flatness | 3.16 μm (PV) | 5 μm (PV) |

图 1 是实测的典型晶体反射波前梯度分布。波前梯度大小反映局域波矢取向发散度，直接影响谐波转换过程中相位匹配，可以简单估算出约 250 nm/cm 的低频反射波前梯度所引起的发散角度在 25 μrad 左右，当基频抽运光强达到 2~3 GW/cm^2 时，会明显影响谐波转换效率。

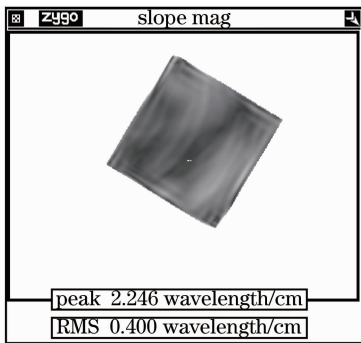


图 1 反射波前的梯度分布

Fig. 1 Gradient of crystal reflection wavefront

图 2 是国内加工晶体反射波前中高频段一维傅里叶频谱，显示晶体表面存在周期约 20 mm 的强烈相位调制，在 NIF 的早期实验中把这类相位扰动称

为波纹，区别于晶体加工中的高频纹理，波纹不仅会影响近场的对比度，还会引起远场焦斑主瓣的畸变，而高频纹理主要影响远场焦斑的旁瓣特性，以及与传输过程中的 B 积分增长，从而导致下游光学元件的自聚焦破坏。图 3 是神光 II 所测得的三次谐波的近场分布，图 4 是下游光学元件中的自聚焦破坏，都与晶体的加工调制有紧密联系。

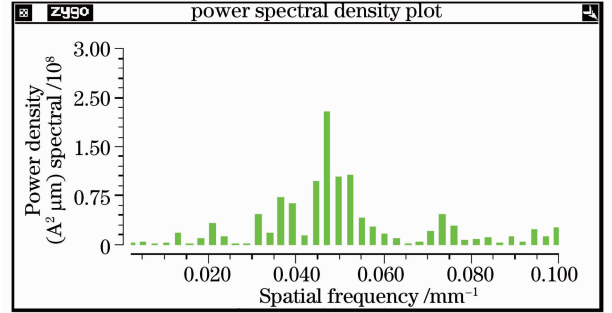


图 2 晶体反射波前一维功率谱密度

Fig. 2 1D Fourier transformation of the crystal reflection wavefront

3 相位调制影响分析

3.1 相位调制与三次谐波转换效率

D. Eimerl 等^[5]分析晶体面形、调制对于谐波转换效率影响，认为 Beamlet 的谐波转换效率受该类扰动影响，理论上引入调制幅度 0.05 的 3 mm 空间周扰动，在高光强下 ($I_{\text{average}} \approx 3 \text{ GW}/\text{cm}^2 @ 1\omega$)，实际效率与理论偏差达到 10%。按文献[6,7]计算方法模拟目前国内加工晶体中高频的相位扰动影响。模拟中将中高频周期性相位扰动表示为

$$\varphi(x, y) = 2\pi\sigma \sin\left(2\pi \frac{x + \sqrt{90000 - y^2}}{\Gamma}\right), \quad (1)$$

式中 σ 代表纹波幅度与波长比值， Γ 表示调制周期。调制幅度 σ 与周期 Γ 相关，一般而言，空间频率越低，调制幅度越大，周期 20 mm 纹波幅度在几十纳米左右，对应的 σ 在 0.1 左右(三倍频波长)，典型的中高频相位扰动如图 5 所示，因为金刚石飞切沿晶体的 o 轴方向(图 5 条纹方向)，该相位调制“光栅”所引起的光束发散沿晶体相位匹配敏感方向，会对谐波转换过程产生明显的影响。

基频抽运光波前由神光 II 第 9 路实际测得(空间周期大于 15 mm 的相位畸变)，如图 6 所示。模拟中还考虑了晶体装夹形变、入射基频光束时间和空间包络均为超高斯分布，光束中心区域的对比度为 0.3 ($I_{\text{RMS}}/I_{\text{average}}$)，入射光束中心区域平均光强为 2.2 GW/cm^2 。谐波转换单元由约 13 mm 厚的 I 类

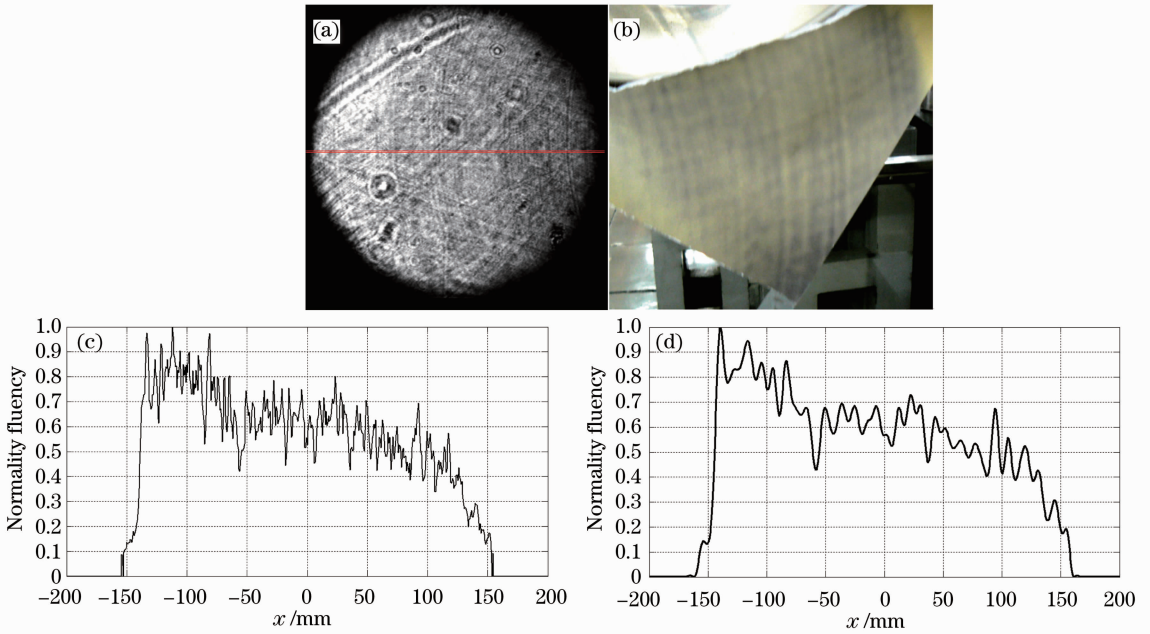


图 3 三倍频近场。(a)实测近场;(b)反激光场图;(c)近场一维分布;(d)平滑滤波后的一维近场

Fig. 3 Near field of 3ω . (a) Near field from CCD; (b) film from reflection laser; (c) 1D distribution of near field; (d) 1D distribution of near field with smoothing filter

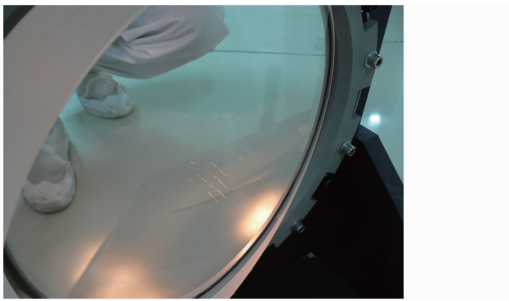


图 4 石英楔板中自聚焦丝

Fig. 4 Self-focus in fused silica wedge

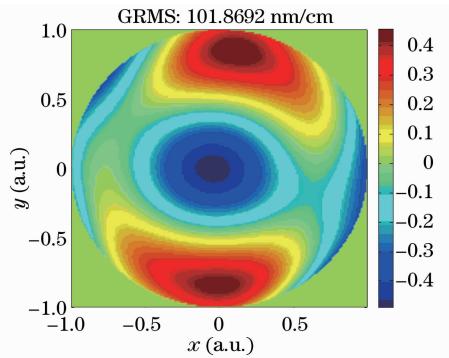


图 6 基频光束波前分布

Fig. 6 Wavefront distribution of 1ω

没有明显的变化,但在考虑晶体面形因素(包括装夹重力变形,面形畸变 PV 值约为 10λ)后效率会出现 2%左右的下降,而晶体加工中高频调制则会引起 3%左右的效率下降。

上述模拟所使用参数与 2010 年的神光 II 升级三倍频实验中一致,在实验中基频为 2500 J, 2.2 ns 的方波,最佳状态时谐波转换效率约为 70%。

3.2 相位调制与三次谐波光束质量变化

图 3 为实验中测得的输出三次谐波近场图像,图 7 是考虑晶体中频相位扰动后的模拟近场。可以看到晶体表面存在的周期相位扰动导致谐波近场产生明显的强度调制,将图像进行低通平滑滤波后,主要的强度调制周期约为 12 mm,这与元件表面反激光在场图纸上表现出的特征基本一致(场图纸感光

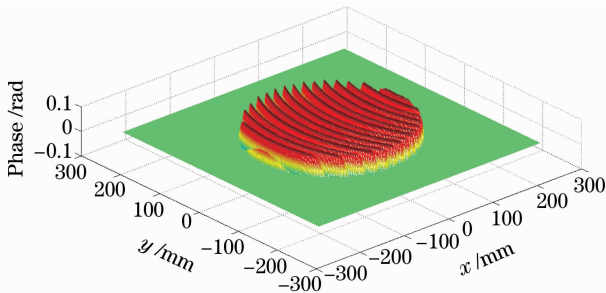


图 5 晶体加工中低频周期性相位调制分布模拟 (调制幅度 0.025,周期 20 mm)

Fig. 5 Stimulation of period phase modulation in middle spatial frequency

倍频晶体,和约 11 mm 厚的三倍频晶体组成,倍频晶体失谐角度为 $185 \mu\text{rad}$ (晶体内部)。

入射为平面波时,谐波转换效率理论上可以达到 78%,仅考虑基频波前扰动时,谐波转换效率并

具有匀化滤波效应,同时元件反激光经过几十米传输后,近场高频成分会因衍射效应减弱),根据一般条纹对比度 γ 定义:条纹最大值与最小值差与和的比值。CCD 测量条纹的对比度 γ 介于 0.1~0.3 之间。

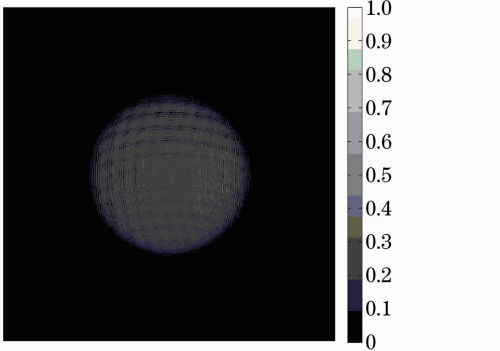


图 7 理论模拟输出的三倍频近场分布
Fig. 7 Stimulation near field distribution of 3ω

文献[8~11]借鉴光束传输过程中小尺度自聚焦 B-T 理论,采用微绕方法处理谐波转换过程中的相位扰动问题,其基本结论是谐波转换过程对扰动具有放大效应,相位扰动幅度会放大 3 倍,强度则放大 9 倍,由于卷积效应,三倍频的远场焦斑的高频部分会产生明显畸变。模拟远场结果显示,中低频周期相位调制将导致远场焦斑产生明显的畸变,焦斑变大甚至分裂。如图 8 所示,基频 80% 能量集中在 $10.5 \mu\text{rad}$ 以内,95% 能量集中在 $16 \mu\text{rad}$ 以内,而三倍频焦斑 80% 能量集中在 $14 \mu\text{rad}$ 以内,95% 能量集中在 $25 \mu\text{rad}$ 以内。在状态方程物理实验中发现采用匀滑后的三倍频激光打靶,等离子体冲击波波前具有明显的周期调制,这个结果进一步说明了晶体中高频的周期相位调制导致三倍频远场产生明显的调制畸变。

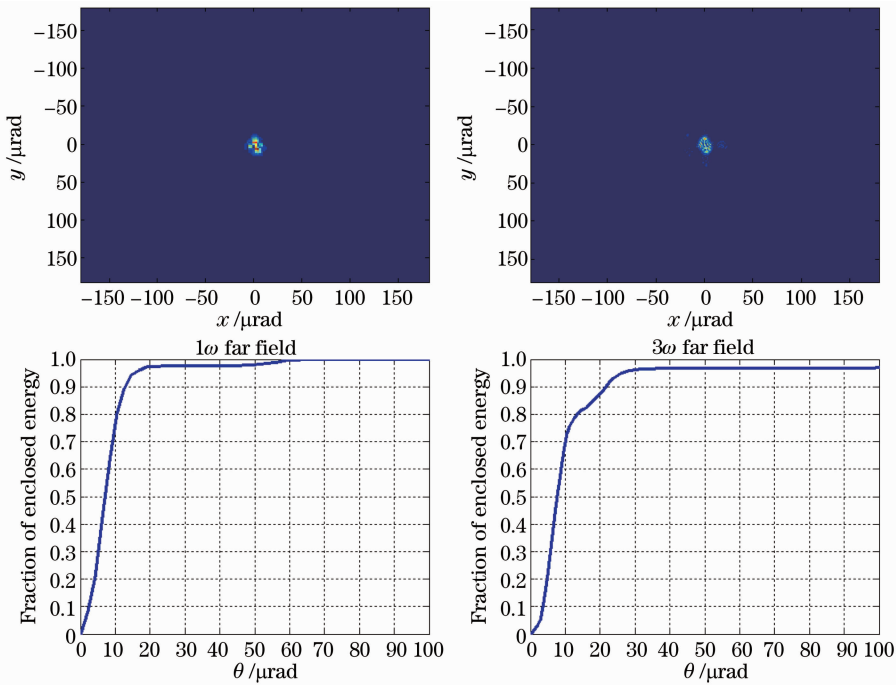


图 8 基频与三倍频远场对比
Fig. 8 Comparisons of far field between 1ω and 3ω

3.3 中高频周期调制与材料的破坏

在高功率激光传输中,一般将 IL (I 为介质中激光光强, L 为光束在介质中的传输距离) 作为控制自聚焦的一个参量,在文献[12]中,通过实验和理论分析,认为 NIF 的石英材料中 IL 应该控制在 25 GW/cm ,在神光 II 实验中发现石英材料三次谐波自聚焦阈值要低很多。图 5 是 2009 年实验中用于谐波分离的熔石英楔板,在经过强激光辐照后产生了自聚焦丝,三倍频的平均光强约为 1.2 GW/cm^2 ,而熔石英楔板产生自聚焦深度约为 12 cm ,对应的 IL

约为 15 GW/cm 。

针对此现象,利用文献[12]中分析石英材料中的紫外光传输的方法,如图 9 所示,将前述三次谐波输出近场作为石英材料中电磁场初值条件,计算材料中的不同深度截面上最大光强,在考虑实际光束的周期相位调制后,发现实际材料中自聚焦产生距离在 17 cm 左右,对应的 IL 约为 20 GW/cm ,据此可以判断,晶体中频的周期相位调制,导致输出三次谐波产生强度调制,下游元件局域负载增加,产生自聚焦破坏的概率增加。在实际器件设计中应考虑安

全边界, IL 不应该超过 15 GW/cm^2 。

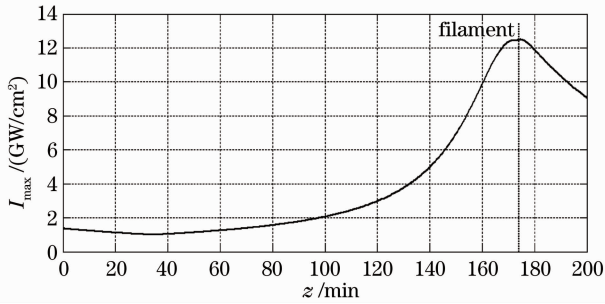


图9 熔石英材料中不同深度处最大光强

Fig. 9 Max intensity at different depths in fused silica

4 中高频周期性相位调制的可能来源

晶体加工调制来源的原因很多,如切削车床本身的振动、真空吸盘本身气压的波动等。结合加工方式,晶体特性,以及晶体检测结果分析,具有约 20 mm 周期特征的中频周期调制最大可能来于晶体自身的吸附形变。晶体加工吸附方式如图 10 所示,吸盘通过气孔吸附材料,气孔栅格间距为 20 mm ,由于晶体非常软且薄,吸附后产生周期形变,晶体沿单一方向切削后,真空吸盘释放后形变恢复,晶体就象底片一样记录下这个形变。在 2009 年实验中晶体表面因横向受激拉曼破坏^[11],破坏处清晰地留有周期约 12 mm 的刀纹痕迹。

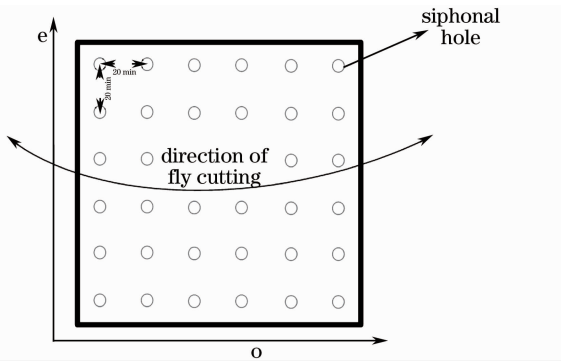


图 10 加工时晶体真空吸附示意图

Fig. 10 Scheme of crystal vacuum chuck

目前国内大口径晶体加工中的中高频周期刀纹的来源还需要进一步确认,在加工质量控制中需要严格执行功率谱密度检测标准^[13],降低中高频的相位调制,特别是消除具有明显周期性特征的相位调制。

5 结 论

晶体加工带入的周期性相位调制对高功率激光驱动器的谐波转换以及三次谐波传输影响是非常剧

烈的,不仅会引起三次谐波近场的强度调制,导致下游光学元件局域负载增加而产生自聚焦破坏,而且会引起远场可聚焦能力下降,影响物理实验。根据 SG II 相关实验测试数据,分析目前大口径晶体加工周期约为 20 mm 的周期相位调制影响,实际测量显示三次谐波近场存在周期 12 mm 左右的周期性强度调制。因此需要改进晶体加工方法,消除晶体加工中周期性相位调制扰动。

参 考 文 献

- 1 R. S. Craxton. High efficiency frequency tripling schemes for high-power Nd:glass lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **17**(9): 1771~1782
- 2 T. R. Boehly, D. L. Brown, R. S. Craxton *et al.*. Initial performance results of the OMEGA laser system [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **133**: 495~506
- 3 C. E. Barker, B. M. Van Wonterghem, J. M. Auerbach *et al.*. Design and performance of the Beamlet laser third harmonic frequency converter[C]. *SPIE*, 1997, **2633**: 398~404
- 4 P. Wegner, J. Auerbach, T. Biesiada *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 180~189
- 5 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
- 6 P. W. Milonni, J. M. Auerbach, D. Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [C]. *SPIE*, 1997, **2633**: 230~241
- 7 J. M. Auerbach, D. Milam, C. E. Barker *et al.*. Frequency-conversion modeling [R]. Springfield: U. S. Department of Commerce National Information Service, 1996. 199~206
- 8 J. M. Auerbach, D. Eimerl, D. Milam *et al.*. Perturbation theory for electric-field amplitude and phase ripple transfer in frequency doubling and tripling [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**: 606~612
- 9 Tao Wang, Tingyu Zhan, Heyuan Zhu *et al.*. Analysis of beam-quality degradation in nonlinear frequency conversion[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(5): 1101~1106
- 10 Wang Fang, Su Jingqin, Li Keyu *et al.*. Increase law of near-field beam modulation in 3ω optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 92~97
王 芳, 粟敬钦, 李格宇等. 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
- 11 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
- 12 D. Milam, J. T. Hunt, K R. Manes *et al.*. Modeling of filamentation damage induced in silica by 351 nm laser pulses[C]. *SPIE*, 1997, **2966**: 425~428
- 13 Ji Lailin, Zhu Baoqiang, Zhan Tingyu *et al.*. The third harmonics generation with large aperture and high fluency[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 094210
季来林, 朱宝强, 詹庭宇等. 大口径高通量三倍频研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 094210

栏目编辑:宋梅梅