

文章编号: 0258-7025(2005)05-0647-04

## 强激光三次谐波转换效率与相位扰动的关系

赵华君<sup>1</sup>, 冯国英<sup>1\*</sup>, 张清泉<sup>2</sup>, 朱启华<sup>2</sup>, 陈建国<sup>1</sup>, 韩敬华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 研究了以 I / II 类角度失谐设置方式下, 高强度激光在 KDP 晶体中的谐波转换问题。采用了包括三阶非线性、离散及衍射等效应的谐波转换计算模型, 详细讨论了在三阶非线性、离散和衍射等效应的情况下, 相位扰动与三次谐波转换 (THG) 效率的关系, 绘出了相应的关系曲线。结果表明, 相位扰动会使三次谐波转换效率降低, 谐波转换效率越高三倍频的调制越小, 提高三次谐波转换效率可以抑制相位扰动对其产生的不利影响。

**关键词** 非线性光学; 三次谐波转换; 相位扰动; 高强度激光; KDP 晶体; 三阶非线性

**中图分类号** O437.1 **文献标识码** A

### Relationship of Third Harmonic Conversion Efficiency and Phase Ripples for High-Intensity Laser

ZHAO Hua-jun<sup>1</sup>, FENG Guo-ying<sup>1</sup>, ZHANG Qing-quan<sup>2</sup>, ZHU Qi-hua<sup>2</sup>,  
CHEN Jian-guo<sup>1</sup>, HAN Jin-hua<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China  
<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** A theoretical analysis is presented for third harmonic conversion in KDP (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) for type I / type II angle-detuning scheme of high-intensity laser. Taking into account the third-order nonlinear, transverse walk-off and diffraction, the conversion efficiency of the third harmonic has been calculated. The results show that the efficiency decreases with the phase ripples of the fundamental wave, and the higher of the THG conversion efficiency is, the smaller of the modulate depth of the output intensity of 3 $\omega$  radiation is, which indicates that by increasing the conversion efficiency the beam quality of the third harmonic can be improved.

**Key words** nonlinear optics; third harmonic conversion; phase ripples; high-intensity laser; KDP crystal; third-order nonlinear

## 1 引言

高强度激光的三次谐波转换 (THG) 是惯性约束核聚变 (ICF) 高功率激光系统的重要环节之一, 对此国内外进行了广泛的研究<sup>[1~4]</sup>。对如何提高谐波转换效率, 改善谐波光束质量, 避免 3 $\omega$  光束 (0.351  $\mu\text{m}$ ) 对晶体及其膜层造成的损伤已成为人们共同关心的问题。以往的研究对 KDP 晶体的三阶非线性效应考虑较少。然而随着激光强度的不断提高, 三阶非线性效应已成为一个不可忽略的因素。当采用 KDP 或 KD\*P 晶体对强激光进行高效二、

三次谐波转换时, 晶体表面加工波纹、缺陷、膜层及晶体内折射率分布的不均匀等诸因素均会引起光束波前相位畸变和振幅调制<sup>[5]</sup>。为了研究相位畸变与三次谐波转换效率之间的关系, 本文采用了包括三阶非线性、离散及衍射等效应的谐波转换计算模型, 详细讨论了三次谐波转换效率与入射光束相位扰动的关系。计算结果表明, 提高三次谐波转换效率可以抑制入射基频光相位扰动引发的 3 $\omega$  光束扰动的增长, 这对高强度激光三次谐波转换的研究和工程设计具有参考意义。

收稿日期: 2004-03-11; 收到修改稿日期: 2004-07-10

基金项目: 中国工程物理研究院与国家自然科学基金会联合基金 (10176019) 资助项目。

作者简介: 赵华君 (1974—), 男, 四川大学电子信息学院硕士生, 主要从事激光与光通信研究。E-mail: zhaohjcu@163.com

\* 通信联系人。E-mail: fgyzl@yahoo.com.cn

## 2 物理模型

根据实际应用情况,对以 I / II 类角度失谐方式设置的 KDP 晶体的三次谐波转换进行了模拟计

算<sup>[6]</sup>。对于 I 类匹配二次谐波产生过程,耦合波方程组为<sup>[7,8]</sup>

$$\begin{aligned} \nabla_{\perp}^2 E_1 + 2in_o(\omega) \frac{\omega}{c} \frac{\partial E_1}{\partial z} = -\frac{\omega^2}{c^2} \bar{\chi} E_1^* E_2 \exp(i\Delta kz) - \\ \epsilon_0 n_o(\omega)^2 \frac{\omega^2}{c} [\gamma_{11} |E_1|^2 + 2\gamma_{12} |E_2|^2] E_1, \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{\perp}^2 E_2 + 2in_e(2\omega) \frac{2\omega}{c} \left[ \frac{\partial E_2}{\partial z} + \rho_{2\omega}(\theta) \frac{\partial E_2}{\partial y} \right] = -\frac{(2\omega)^2}{2c^2} \bar{\chi} E_1^2 \exp(-i\Delta kz) - \\ \epsilon_0 n_o(2\omega)^2 \frac{(2\omega)^2}{c} [2\gamma_{21} |E_1|^2 + \gamma_{22} |E_2|^2] E_2. \end{aligned} \quad (1b)$$

对于 II 类匹配方式产生三次谐波过程,耦合波方程组为

$$\begin{aligned} \nabla_{\perp}^2 E_1 + 2in_e(\omega) \frac{\omega}{c} \left[ \frac{\partial E_1}{\partial z} + \rho_{\omega}(\theta) \frac{\partial E_1}{\partial y} \right] = -\frac{\omega^2}{c^2} \bar{\chi} E_2^* E_3 \exp(i\Delta kz) - \\ \epsilon_0 n_e(\omega)^2 \frac{\omega^2}{c} [\gamma_{11} |E_1|^2 + 2\gamma_{12} |E_2|^2 + 2\gamma_{13} |E_3|^2] E_1, \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{\perp}^2 E_2 + 2in_o(2\omega) \frac{2\omega}{c} \frac{\partial E_2}{\partial z} = -\frac{(2\omega)^2}{c^2} \bar{\chi} E_1^* E_3 \exp(i\Delta kz) - \\ \epsilon_0 n_o(2\omega)^2 \frac{(2\omega)^2}{c} [2\gamma_{21} |E_1|^2 + \gamma_{22} |E_2|^2 + 2\gamma_{23} |E_3|^2] E_2, \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{\perp}^2 E_3 + 2in_e(3\omega) \frac{3\omega}{c} \left[ \frac{\partial E_3}{\partial z} + \rho_{3\omega}(\theta) \frac{\partial E_3}{\partial y} \right] = -\frac{(3\omega)^2}{c^2} \bar{\chi} E_1 E_2 \exp(-i\Delta kz) - \\ \epsilon_0 n_e(3\omega)^2 \frac{(3\omega)^2}{c} [2\gamma_{31} |E_1|^2 + 2\gamma_{32} |E_2|^2 + \gamma_{33} |E_3|^2] E_3, \end{aligned} \quad (2c)$$

其中  $E_1, E_2$  和  $E_3$  分别是  $1\omega, 2\omega, 3\omega$  的复振幅;  $\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  是横向拉普拉斯算符,  $\bar{\chi} = \chi \sin 2\theta \cos 2\phi$  是有效非线性系数,  $\phi$  是方位角,  $\Delta k$  是相位失配量,  $\theta$  是光传播方向  $z$  与光轴的夹角,  $c$  为真空中的光速,

$$\begin{aligned} \rho_{\omega}(\theta) &= \frac{1}{n_e(\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(\omega, \theta)}{\partial \theta}, \\ \rho_{2\omega}(\theta) &= \frac{1}{n_e(2\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(2\omega, \theta)}{\partial \theta}, \\ \rho_{3\omega}(\theta) &= \frac{1}{n_e(3\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(3\omega, \theta)}{\partial \theta}, \end{aligned}$$

是离散因子,  $\gamma_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  是三阶非线性系数,  $n_e(\omega, \theta), n_e(2\omega, \theta)$  和  $n_e(3\omega, \theta)$  分别是基频、二倍频和三倍频 e 光的折射率,  $n_o(\omega), n_o(2\omega)$  分别是基频和二倍频 o 光的折射率。

受到相位扰动的入射光束可写为<sup>[2]</sup>

$$E(x, y) = E_0(x, y) \exp(i\phi_p), \quad (3)$$

式中  $E_0$  为无相位扰动及振幅调制光束的场分布,  $\phi_p$  是入射基频光的相位调制函数, 表示为

$$\phi_p(x, y) = 2\pi\sigma_p [\cos(2\pi x/l) + \cos(2\pi y/l)],$$

其中  $\sigma_p$  为调制深度,  $l$  为调制周期。

采用快速傅里叶变换和四阶龙格-库塔法 (R-K)<sup>[9]</sup> 求解耦合波方程组(1)和(2)。设入射光束为 10 阶超高斯光束, 其中,  $\lambda_0 = 1.054 \mu\text{m}$ ,  $w_0 = 10 \text{ mm}$ ,  $l = 2 \text{ mm}$ , I/II 类角度失谐的相位匹配角分别为  $\theta_s = 41.2^\circ$ ,  $\phi_s = 45^\circ$  和  $\theta_T = 59^\circ$ ,  $\phi_T = 0^\circ$ ; 二倍频、三倍频 KDP 晶体厚度分别为 11 mm 和 9 mm, 三倍频时相位完全匹配, KDP 晶体的非线性系数  $\chi = 0.78 \text{ pm/V}$ , KDP 晶体的三阶非线性系数  $\gamma_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  采用 LLE 的实验数据<sup>[10]</sup>。二倍频晶体入射端面处有  $E_2 = 0$ , 三倍频晶体入射端面处有  $E_3 = 0$ 。

## 3 数值计算及结果分析

当初始入射光束的峰值功率密度  $I_0 = 5 \text{ GW/cm}^2$  时, 计算得到的失谐角(二倍频时二次谐波传输方向与完全相位匹配方向间的轻微失配的夹角称为失谐角)与三次谐波转换效率关系如图 1 所示。无相位调制情况下三次谐波转换效率在失谐角  $\Delta\theta = 280 \mu\text{rad}$  时有最大值 96%, 如曲线 a 所示; 随着调制

度的增加,三次谐波转换效率随失谐角的变化如曲线 b~d 所示,其最大三次谐波转换效率分别为 91%,79% 和 51%,对应初始入射基频光的相位调制深度( $\sigma_p$ )为 0.01,0.02,0.04。由此可见在 I/II 类角度失谐的匹配方式下,随着相位调制度的增加,三次谐波能达到的最大转换效率会下降。

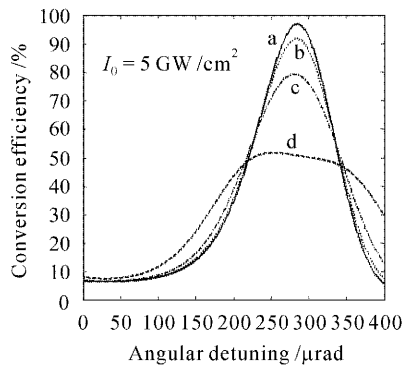


图 1 不同相位调制深度时失谐角与三次谐波转换效率的关系

Fig.1 Third harmonic conversion efficiencies as a function of angular detuning for different phase modulating depths for type I/II phase matching (a,b,c,d:  $\sigma_p=0, 0.01, 0.02, 0.04$ )

图 2 给出了初始入射基频光峰值功率密度分布与三次谐波转换效率关系。从曲线 a 可以看出,无相位调制时,三次谐波在  $I_0=2.8\sim 6.9 \text{ GW/cm}^2$  的较宽范围内保持了高的转换效率( $>90\%$ );当  $\sigma_p=0.01$  时,仅在  $I_0=3\sim 5.4 \text{ GW/cm}^2$  范围内三次谐波转换效率高于  $90\%$ ,且相对无相位调制时的转换效率也有明显降低,如曲线 b 所示; $\sigma_p$  达到 0.02 时,

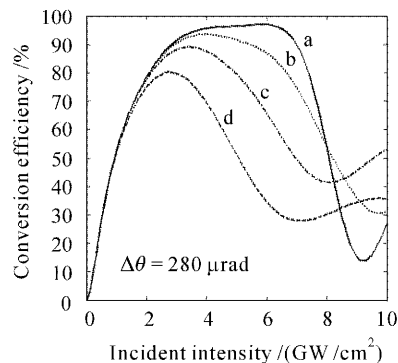


图 2 不同相位调制深度时初始入射基频光峰值功率与三次谐波转换效率的关系

Fig.2 Third harmonic conversion efficiencies as a function of incident intensity for different phase modulation depths for type I/II phase matching (a,b,c,d:  $\sigma_p=0, 0.01, 0.02, 0.04$ )

最大转换效率相应地降低到  $89\%$ ,与无调制情况相比,转换效率的减小更加明显,如曲线 c 所示;当  $\sigma_p$  进一步增加到 0.04 时,其最大值降到仅为  $79\%$ ,此时对应入射基频光峰值功率密度  $I_0=2.7 \text{ GW/cm}^2$ ,如曲线 d 所示。从以上分析可以看出,减小相位调制度不但可以提高三次谐波转换效率,而且还能在较宽的功率密度范围内使三次谐波获得高的转换效率。

图 3 是初始入射基频光在  $\sigma_p=0.005, I_0=5 \text{ GW/cm}^2$  时,通过改变失谐角计算得出的不同三次谐波转换效率时输出基频光和二、三次谐波的空间横向分布情况。从图 3(a)可以看出,当三次谐波转换效率为  $60\%$  时,在谐波转换过程中各次谐波产生了明显的丝状分裂,这在  $3\omega$  光束表现尤为显著,其光强调制度达到了  $35\%$ 。图 3(b)中,当三次谐波转换效率增加到  $85\%$  时, $3\omega$  光束的光强调制度降低到  $21\%$ ,当三次谐波转换效率进一步增加到  $95\%$  时, $3\omega$  光束的光强调制度降低到仅为  $6\%$ ,如图 3(c)所示。由此可见当相位调制度相同时谐波转换效率越高,相应  $3\omega$  光束的光强调制也越小,因此提高三次谐波转换效率可以有效地抑制相位扰动对  $3\omega$  光束的光强调制,避免  $3\omega$  光束对晶体及膜层造成损伤。

为了进一步研究三次谐波转换效率与相位扰动的关系,我们计算了入射基频光在不同相位调制深度时,三次谐波转换效率与  $3\omega$  光束的光强空间调制度的关系,如图 4 所示。随着转换效率的提高  $3\omega$  光束的光强调制度有逐渐减小的趋势。转换效率相同时,初始入射基频光的相位扰动越大, $3\omega$  光束的光强调制度也越大。计算结果显示,当三次谐波转换效率为  $20\%$ , $\sigma_p$  分别为 0.002,0.005,0.01 时对应  $3\omega$  光束的光强调制度为  $27\%, 51\%$  和  $79\%$ ;当三次谐波转换效率达到  $90\%$  时,其调制度分别减小到  $7\%, 15\%, 25\%$ 。由上述分析可以看出,三次谐波转换效率对  $3\omega$  光束有重要影响,在入射基频光相位调制度一定时, $3\omega$  光束的光强调制度随三次谐波转换效率的提高而减小。

同样,钱列加等<sup>[11]</sup>在三倍频的近似模型中也发现, $3\omega$  光束的振幅扰动在高转换效率时与入射基频光的振幅扰动相当,而在转换效率较低时约为入射基频光振幅的三倍。众所周知,相位扰动在光束传输过程中会转化成振幅的扰动,因此,提高三次谐波转换效率可以抑制相位扰动对  $3\omega$  光束的影响。

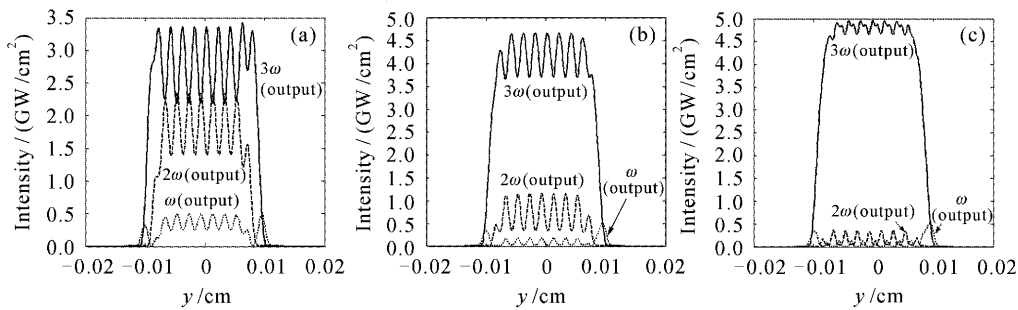


图3 相同初始相位调制时不同三次谐波转换效率的谐波转换关系。三次谐波转换效率为 60% (a), 85% (b), 95% (c)  
 Fig.3 Intensity distribution of  $\omega$ ,  $2\omega$  and  $3\omega$  for different third harmonic conversion efficiencies as the same original phase modulating depths for type I/II phase matching. THG conversion efficiency 60% (a), 85% (b), 95% (c) ( $I_0 = 5 \text{ GW/cm}^2$ ,  $\sigma_p = 0.005$ )

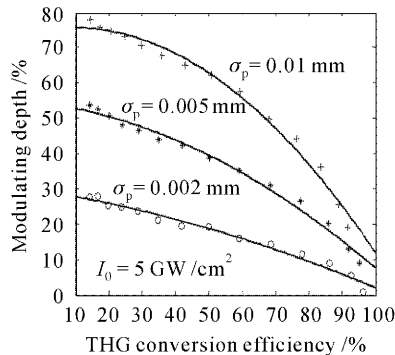


图4 不同相位调制深度时三次谐波转换效率与  $3\omega$  光束光强调制深度的关系

Fig.4 Modulation depths of  $3\omega$  wave for different original phase modulating depths as a function of third harmonic conversion efficiencies

## 4 结 论

针对 I / II 类角度失谐设置方式下的三次谐波转换过程,在充分考虑了 KDP 晶体三阶非线性、离散和衍射等效效应后,研究了相位扰动与三次谐波转换效率之间的关系。结果表明,三次谐波转换效率随入射基频相位调制深度的增加而减小,提高三次谐波转换效率可以抑制入射基频光相位扰动引发的  $3\omega$  光束扰动的增长。因此,在进行三次谐波实验时应采用空间滤波器等减小初始入射光束的波前扰动,在加工 KDP 晶体时还应尽量减小引发光束波前相位畸变的缺陷,以提高三次谐波转换效率。另外,针对给定的入射光束功率应选择最佳的失谐角,这不但可以提高谐波转换效率,而且又能抑制  $3\omega$  光束的扰动幅度。

## 参 考 文 献

- 1 M. R. Kozlowski, R. Mouser, S. Maricle *et al.*. Laser Damage Performance of Fused Silica Optical Components Measured on the Beamlet Laser at 351 nm[R]. 1998, UCRL-JC-131221
- 2 He Yujuan, Cai Bangwei, Wei Xiaofeng *et al.*. Effect of phase ripples on the third harmonic generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(9): 789~792  
何钰娟,蔡邦维,魏晓峰等. 位相扰动对三次谐波转换的影响[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(9): 789~792
- 3 Qian Liejia, Zhu Baoqiang, Zhang Zhuhong *et al.*. Harmonic generation of phase aberrated laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 417~419  
钱列加,朱宝强,张筑虹等. 位相畸变激光束的谐波转换[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 417~419
- 4 M. A. Henesian, P. J. Wegner, D. R. Speck *et al.*. Modeling of large aperture third harmonic frequency conversion of high power Nd:glass laser systems[C]. *SPIE*, 1991, **1415**: 90~103
- 5 Chen Chao, Zhang Jian, Liu Xinyuan *et al.*. Study on laser frequency short-term stability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **23**(12): 1649~1652  
陈超,张剑,刘新元等. 原子饱和吸收谱谐波稳频短期稳定性研究[J]. *光学学报*, 2004, **23**(12): 1649~1652
- 6 Baoqiang Zhu, Tianguy Zhan, Zhen Gu *et al.*. Third harmonic generation of high-energy large-aperture one micro laser and its spatial beam property investigation[C]. *SPIE*, 2001, **4268**: 36~42
- 7 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
- 8 Yoonchan Jeong, Byoungoo Lee. Characteristics of second-harmonic generation including third-order nonlinear interactions [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(10): 1292~1299
- 9 Peter J. Wegner, Jerome M. Auerbach, C. E. Barker *et al.*. Frequency converter development for the national ignition facility[R]. 1998, UCRL-JC-129725
- 10 W. P. Milonni, J. M. Auerbach, David Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams[C]. *SPIE*, 1997, **2633**: 230~241
- 11 LLE 1998 Annual Report[R]. DOE/SF/19460-275, Vol. 74: 125~130
- 12 Qian Liejia, Deng Ximing. Approximate model on transform of beam characteristics in frequency tripling [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(9): 1223~1226  
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